

Ein hydrologisches Modell für tidebeeinflusste Flussgebiete

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von

Dipl.-Geogr. Gerhard Riedel
aus Gifhorn

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. U. Maniak
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. H.-B. Kleeberg
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. N. Dichtl
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. M. Krafczyk
Eingereicht am:	19. September 2003
Mündliche Prüfung am:	13. Januar 2004

2004

*Überall geht ein frühes Ahnen
dem späteren Wissen voraus.*

Alexander von Humboldt

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig.

Herr Prof. Dr.-Ing. U. Maniak hat mir als Diplom-Geograph die Ingenieurhydrologie nahe gebracht und die Bearbeitung von Forschungs- und Projektarbeiten ermöglicht, welche die Grundlage für diese Arbeit bilden. Für die Übernahme der Berichterstattung, die umfangreiche fachliche und persönliche Unterstützung möchte ich mich sehr herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H.B. Kleeberg möchte ich ebenfalls für die Übernahme der Berichterstattung sehr herzlich danken. Herr Prof. Dr.-Ing. W. Krafczyk stand für die Prüfung und Herr Prof. Dr.-Ing. N. Dichtl für den Vorsitz zur Verfügung. Ihnen gilt mein Dank.

Allen Kollegen, Studenten und Freunden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich ebenfalls herzlich danken. Namentlich hervorheben möchte ich dabei Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Stödter und meine Kollegen Dipl.-Ing. S. Brinck, Dipl.-Ing. R. Bittner, Dipl.-Ing. M. Anhalt, die mich nicht nur fachlich unterstützt und motiviert haben.

Hervorheben möchte ich an dieser Stelle ebenfalls die Studenten, deren Arbeiten in dieser Dissertation Eingang gefunden haben: Dipl.-Ing. S. Schmitt, Dipl.-Ing. S. Zasada, Dipl.-Ing. (FH) H. Menzefricke, Dipl.-Ing. S. Werner und cand.-Ing. C. Plogmeier.

Mein besonderer Dank gilt auch dem Bremischen Deichband am rechten Weserufer, der, vertreten durch Dipl.-Ing. W. Döscher, durch die Bereitstellung seiner sehr umfangreichen Datensammlung für das Einzugsgebiet der Lesum diese Arbeit erst ermöglicht hat.

Meiner Frau gebührt mein Dank für ihre Geduld.

Braunschweig, im November 2004

Gerhard Riedel

Kurzfassung

Die Wasserwirtschaft in tief liegenden, tidebeeinflussten Einzugsbieten ist durch künstliche Entwässerung mit Sielbauwerken, Schöpfwerken und ein dichtes Grabensystem geprägt. Unter dem Einfluss eines zu erwartenden Meeresspiegelanstiegs müssen geeignete Maßnahmen zur Kompensation der verschlechterten natürlichen Entwässerung entworfen werden. Mit Simulationsrechnungen können die Maßnahmen auf Nachhaltigkeit geprüft werden. Geeignete Modelle müssen dabei den Wasserhaushalt der Landoberfläche, die Zwischenspeicherung im Flussgebiet, die Betriebsweise der Siel- und Schöpfwerke und rückstaubeeinflusste Abflüsse simulieren können. Bisher erfolgt die Berechnung instationärer, rückstaubeeinflusster Abflüsse und Wasserstände überwiegend mittels hydraulisch-numerischer Modelle (HN-Modelle), für die Abflussganglinien als Randbedingungen vorgegeben werden müssen. Die Abflussganglinien werden durch Pegelaufzeichnungen oder Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) bereitgestellt. Wegen des hohen Rechenaufwandes und der aufwändigen Parametrisierung sind hydraulisch-numerische Verfahren für die Simulation ganzer Flussgebiete allerdings wenig geeignet, so dass sich das Einsatzgebiet von HN-Modellen auf Gewässerabschnitte beschränkt.

In dieser Arbeit wird ein hydrologischer Speicherbaustein entwickelt, mit dem die Simulation rückstaubeeinflusster Abflüsse im Einzugsgebietsmaßstab ermöglicht wird. Der als Kettenspeicheransatz bezeichnete Baustein wird in das vom Verfasser entwickelte, konzeptionelle Niederschlag-Abfluss-Modell NAXOS integriert. Das Gewässernetz eines Einzugsgebiets wird in mehrere Kategorien untergliedert und zu Kettenspeichern zusammengefasst. Durch Integration von Modulen für die Simulation von Sielen und Schöpfwerken wird das Einsatzgebiet des Modells NAXOS auf tidebeeinflusste Einzugsgebiete erweitert. Durch die Beschränkung auf die Sohlrauheit und geometrisch erfassbare Modellparameter Querschnitt und Gewässerlänge ist der Kettenspeicheransatz leicht parametrisierbar und auf andere Flussgebiete übertragbar. Hierdurch wird auch die Kalibrierung eines Flussgebietsmodells auf wenige, ereignisabhängige Kenngrößen reduziert.

Die raumbezogenen Eingangsdaten des Modells wie Gewässernetz, Topografie, Oberflächenbeschaffenheit und Messstationen werden durch ein Geografisches Informationssystem (GIS) verwaltet. Das digital verfügbare Gewässernetz wird vom Modell durch Einteilung in drei Gewässerkategorien

bei der Parametrisierung der Abflusskonzentration und des verfügbaren Grabenstauraums genutzt. NAXOS enthält Funktionen zur Berechnung von Speicherinhaltslinien. Die Rückgangskonstanten des Landflächenabflusses werden durch Berechnung der mittleren Hanglänge anhand der Gewässerdichte weniger skalenabhängig. Dadurch vergrößert sich die Bandbreite, innerhalb derer der verwendete Abflusskonzentrationsansatz in verschiedenen Raumskalen und auf verschiedenen großen Flussgebieten angewendet werden kann.

Für die zwei tidebeeinflussten Untersuchungsgebiete Käseburger Sieltief (72 km²) und Lesum 148 km² (ca. 1 200 km Grabensystem) (Gesamtgebietsgröße des Flussgebietsmodells: 2 200 km² einschliesslich Wümme und Hamme) werden Langfristsimulationen durchgeführt. Mit einer Sensitivitätsanalyse werden verschiedene Einflussgrößen aufgezeigt. Die mit dem Verfahren des Verfassers berechneten Wasserstände werden mit Naturmessungen und den Ergebnissen eines hydrodynamisch-numerischen Modells verglichen. Anhand der Vergleichsrechnungen wird gezeigt, dass der entwickelte Ansatz unter vergleichbaren Randbedingungen mit einem HN-Modell gleichwertige Simulationsergebnisse liefert.

Abstract

Low lying coastal areas with tidal influence are often characterised by a dense stream network with artificial drainage, sluices and pumping stations. Due to climate change and increasing sea water levels the natural drainage is expected to decrease. Compensation methods have to be designed and verified by simulation models. These models have to deal with water balance, runoff with respect to backwater effects and operating methods of sluices and pumping stations.

Simulations of unsteady flow with backwater effects are predominantly performed by hydraulic-numeric models (hn-models). Runoff is given by precipitation-runoff models (pr-models) or by recorded hydrographs. The complexity of calculation and parametrisation reduces hn-models to applications on river sections.

The presented thesis deals with the development of a hydrological component for catchment models to consider backwater effects on runoff simulation. The chained storage method (Kettenspeicheransatz) is integrated into the pr-model NAXOS. The drainage network is divided into three categories by cross-section widths. With these categories three physical (chain) storages for each subcatchment are generated from cross-section widths and drainage network lengths with the support of GIS-like functions of NAXOS. Modules for simulation of sluices and pumping stations are integrated into NAXOS as well. Model parameters of chain storages are limited to roughness by Manning-Strickler and geometric parameters length, width and height and can be easily transferred to other catchments.

Space-oriented parameters of NAXOS are governed by a GIS system. These parameters include the drainage network that is utilised for the calculation of the drainage network density and mean slope length. A module for the simulation of runoff concentration with respect to drainage network density is presented and implemented into the model NAXOS. The mean slope length is a catchment parameter independent from scale. It is used in order to reduce scale impacts on runoff concentration.

The presented methods are applied on two catchments Käseburg (72 km²) and Lesum (2 200 km²) with tidal impact and drainage network densities higher than 10 000 m/km². Within the Lesum catchment the focus is held on a section of ca. 100 km². Long time simulations of several months and a

comparision of NAXOS results with hn-model results prove the applicability of the presented methods.

4 Hydrologische Simulation der Abflüsse in rückstaubeeinflussten Gebieten	47
4.1 Abfluss- und Wasserstandsberechnung	47
4.2 Abflussberechnung mit Rückstau	62
4.3 Eingangsdaten für die mesoskalige hydrologische Abfluss- und Wasserstandsberechnung	67
4.4 Entwicklung des Kettenspeicheransatzes für das Modell NAXOS	69
4.4.1 Definitionen	69
4.4.2 Integration des Kettenspeicheransatzes in das Modell NAXOS	70
4.4.3 Gleichungssystem und Programmablauf	71
4.4.3.1 Erweiterung des Seeretentionsverfahrens	71
4.4.3.2 Randbedingungen	73
4.4.3.3 Abarbeitung der Rechenschritte und Fallunterscheidungen	74
4.5 Wasserbauwerke für den Kettenspeicheransatz	80
4.5.1 Siel mit Stemmtoren	80
4.5.2 Mündungsschöpfwerk	83
4.5.3 Schütz	83
4.5.4 Stauklappe	85
5 Modellanwendung	87
5.1 Flussgebietsmodell Käseburger Sieltief	88
5.1.1 Aufbau des Flussgebietsmodells	88
5.1.2 Simulationen	90
5.2 Flussgebietsmodell Lesum	98
5.2.1 Aufbau des Flussgebietsmodells	98
5.2.2 Simulation	102
6 Vergleichende Berechnungen mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell	113
6.1 Allgemeines	113
6.2 Verwendete hydraulische Elemente	114
6.2.1 Speicher	114
6.2.2 Siele	114

6.2.3 Schöpfwerk	117
6.3 Aufbau des HN-Modells und Kalibrierung	118
6.4 Vergleich simulierter Wasserstände von HN-Modell und N-A-Modell	121
6.5 Sensitivitätsanalyse	128
6.6 Bewertung der Varianten	131
7 Zusammenfassung	135
8 Literaturverzeichnis.....	141
Anhang.....	147

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1.1	Hydrologische Prozesse und Einflussgrößen im N-A-Modell NAXOS	5
Abb. 2.3.1	Beispiel für die Zuordnung zu Niederschlagsstationen beim IDW-Verfahren	12
Abb. 3.1.1	Kumulative Gerinnenetzdichte und 20-jährliche Abflussspenden.....	31
Abb. 3.1.2	Einzugsgebiet der Lesum, Gewässernetz der Fläche 494.76 bei Maßstab 1:5 000 (links) und 1:50 000 (rechts).....	33
Abb. 3.2.1	Teilfläche mit sehr kurzem Hauptgerinne bezogen auf Flächengröße	34
Abb. 3.2.2	Anzahl der nach der Hydrographischen Karte Niedersachsen klassifizierten Einzugsgebietsgrößen	35
Abb. 3.2.3	Schema der Exfiltration ohne und mit Haupt- und Nebengerinne.....	37
Abb. 3.2.4	Berechnete Abflussganglinien eines rasterbasierten Einzugsgebiets mit verschiedenen Aggregationsstufen	38
Abb. 3.2.5	Einfluss der Raumskala auf direkte Abflusskomponenten am Beispiel des Pegels Duendorf / Südaue (Allergebiet).....	39
Abb. 3.3.1	Generalisierung des Gewässernetzes in Speicher am Beispiel der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum.....	42
Abb. 3.3.2	Hypsografische Kurve für die Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum	44
Abb. 3.3.3	Schema der Einordnung der Grabenquerschnitte in die hypsografische Kurve nach den Flächenanteilen jeder Grabenkategorie am Beispiel der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum	45
Abb. 3.3.4	Speicherinhaltslinien der Speicher der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum.....	46
Abb. 4.1.1	Normalabfluss zwischen Querschnitt 1 und 2	47
Abb. 4.1.2	Volumenelement der Länge dx eines Fließabschnitts.....	49
Abb. 4.1.3	4-Punkte-Schema nach Preissmann.....	52
Abb. 4.1.4	Hilfsgrafik zur Puls-Methode	59
Abb. 4.1.5	Gegliedeter Flussquerschnitt	62

Abb. 4.2.1	Kennzeichnende Wasserstände am Siel	63
Abb. 4.2.2	Schema der Rückgestauten Linearen Speicherkaskade	64
Abb. 4.4.1	Schematischer Schnitt durch ein Marscheinzugsgebiet mit Teilflächen bei freier Vorflut, drei rückstaubeinflussten Kettenspeichern und tidebeeinflusstem Außenpeil unterhalb eines Sieles.....	70
Abb. 4.4.2	Zu- und Abflüsse für das Hauptgerinne einer Teilfläche mit Kettenspeicher und Bezeichnung der Kettenspeicher bei der Abflussberechnung	76
Abb. 5.1	Übersicht über die Lage der Untersuchungsgebiete Käse- burger Sieltief und Lesum an der unteren Weser	87
Abb. 5.1.1	Teilflächenplan, Hauptsieltief und Entwässerungsrichtung im Flussgebietsmodell Käseburger Sieltief	88
Abb. 5.1.2	Ausschnitt aus dem Grabensystem im Käseburger Sieltief	89
Abb. 5.1.3	Mit Sielformel berechnete und mit NAXOS simulierte Abflüsse und Abflusssumme am Käseburger Siel (Januar - Oktober 1991).....	93
Abb. 5.1.4	Mit Sielformel berechnete mittlere Sielzugabflüsse und von NAXOS simulierte Abflüsse und Abflusssummen über 14 Tage am Käseburger Siel (18.01. bis 01.02.1991).....	94
Abb. 5.1.5	Mit NAXOS simulierte und beobachtete Wasserstände über 14 Tage am Käseburger Siel (18.01. bis 01.02.1991).....	95
Abb. 5.1.6	Mit NAXOS simulierte und beobachtete Binnenwasserstände und Zuwässerung am Käseburger Siel (Januar - Oktober 1991).....	97
Abb. 5.2.1	FGM Lesum: Sieleinzugsgebiete, Pegel und Hauptsieltiefs Maschinenfleet, Kleine Wümme und Kuhgraben	99
Abb. 5.2.2	Gewässernetz im FGM Lesum	101
Abb. 5.2.3	Querschnitte in [m] der Grabenkategorien	102
Abb. 5.2.4	Berechnete und simulierte Abflusssummen an den Sielen der Gebiete Wasserhorst und Kuhsiel	106
Abb. 5.2.5	Beobachtete und simulierte Wasserstände am Pegel Geerkenstau Binnenpeil zwischen 09.06. und 12.06.1998	108
Abb. 5.2.6	Beobachtete und simulierte Wasserstände am Schütz Wasserhorst Binnenpeil zwischen 05.06. und 12.06.1998.....	109

Abb. 5.2.7	Regelkreis: Wasserstand am Betriebspegel Walle und Steuerung von Schützstellung und Schöpfwerksbetrieb (Wasserhorst)	110
Abb. 6.2.1	Schematische Darstellung einer Stauklappe	115
Abb. 6.2.2	Schematische Darstellung eines Schützes	116
Abb. 6.3.1	Struktur des HN-Modells und Bedeutung der Symbole	118
Abb. 6.3.2	Mit dem HN-Modell simulierte und gemessene Wasserstände am Pegel 4 (Walle MVA) bei der Kalibrierung	120
Abb. 6.3.3	Mit dem HN-Modell simulierte und gemessene Wasserstände am Pegel 3 (Ritterhuder Heerstraße) bei der Kalibrierung	120
Abb. 6.4.1	Summenlinien der berechneten und mit NAXOS in Variante 2 simulierten Abflüsse aus Wasserhorst und Zuflüsse vom Kuhsiel	122
Abb. 6.4.2	Mit Überfallformeln berechnete Zu- und Abflüsse des Hauptsieltiefs und von NAXOS in Variante 2 simulierte gesielte und geschöpfte Abflüsse	123
Abb. 6.4.3	Vergleich der beobachteten und simulierten Binnenwasserstände von HN-Modell und NAXOS mit den Varianten 1 und 2 am Pegel 2 Wasserhorst	124
Abb. 6.4.4	Abweichungen der simulierten von beobachteten Wasserständen am Pegel 2 Wasserhorst (Binnenpeil)	125
Abb. 6.4.5	Vergleich der simulierten Wasserstände von NAXOS und ISIS mit beobachteten Wasserständen am Pegel 3 Ritterhuder Heerstraße	127
Abb. 6.4.6	Vergleich der simulierten Wasserstände von NAXOS und ISIS mit gemessenen Wasserständen am Pegel 4 MVA Walle	128
Abb. 6.5.1	Mit NAXOS in Variante 1 am Pegel Walle berechneter Wasserstand bei beobachteten und veränderten Niederschlägen	131

Abbildungen im Anhang

Abb. A1	Eingangsdaten und Ergebnisse auf der Programmoberfläche von NAXOS	148
Abb. A2	Schätzung der effektiv beitragenden Fläche aus der kumulativen Gerinnelänge (hergeleitet aus den Werten für das Wiederkehrintervall 20 Jahre; aus: Kölla, 1987)	149
Abb. A3	Fließzeit-Flächen-Diagramm für 3 Aggregationsstufen (27, 4, 1 Teilflächen) am Beispiel Südaue (Allergebiet)	149
Abb. A4	Abflusskurve, Speicherinhaltslinie, Zufluss- und retendierte Abflussganglinie (aus: Maniak, 1997)	150
Abb. A5	Aufsicht und Längsschnitt des Käseburger Siel (aus: Kunz, 1975)	150
Abb. A6	Fallunterscheidungen zur Berechnung der Sielleistung	151
Abb. A7	Schützstellungen am Siel Wasserhorst [m]	152
Abb. A8	Berechnete Zu- und Abflusssummen für das Sieleinzugsgebiet Wasserhorst (Kalenderjahr 1998)	152
Abb. A9	Binnenpeil am Betriebspegel Munte und eingestellte Höhe der Stauklappe Geerkenstau im Kalenderjahr 1998	153
Abb. A10	Berechnete und simulierte Abflüsse und Abflusssummenlinien am Geerkenstau	153
Abb. A11	Beobachtete und simulierte Wasserstände am Geerkenstau (Binnenpeil)	154
Abb. A12	Berechnete und simulierte Abflüsse und Abflusssummenlinien am Schütz Wasserhorst	154
Abb. A13	Beobachtete und simulierte Wasserstände am Schütz Wasserhorst (Binnenpeil)	155
Abb. A14	Beobachtete und simulierte Wasserstände und simulierte Abflüsse am Betriebspegel Walle MVA	155
Abb. A15	Beobachtete und simulierte Wasserstände am Betriebspegel Munte / Kuhsiel	156

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.2.1	In NAXOS integrierte GIS-Funktionen mit Funktionsbeschreibung, abgeleiteten Kennwerten und Parametern	9
Tab. 2.6.1	Ausgegebene Bilanzgrößen	25
Tab. 3.1.1	Gewässerdichten innerhalb des Einzugsgebiets der Weser	32
Tab. 3.3.1	Grabenlängen, Grabenflächen und Flächenanteil der Gräben an der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum ($A_{Tfl} = 1,2 \text{ km}^2$).....	45
Tab. 4.1.1	Verfahren zur Berechnung des Wellenablaufes (nach Kinzelbach et al., 2003, verändert).....	60
Tab. 4.5.1	Sielstellungen für das rechte (r) und linke (l) Schütz	84
Tab. 5.1.1	Summen der Grabenlängen je Kategorie des digitalisierten Grabensystems in den Teilflächen nach dem Hydrographischen Atlas Niedersachsen.....	90
Tab. 5.1.2	Modellparameter für das Käseburger Sieltief	92
Tab. 5.2.1	Flächennummer, Gebietsgrößen, Entwässerungsrichtung und Schöpfwerksleistung der Sieleinzugsgebiete im FGM Lesum	98
Tab. 5.2.2	Sollwasserstände an den Betriebspegeln	100
Tab. 5.2.3	Modellparameter für die Sieleinzugsgebiete Wasserhorst und Kuhsiel im FGM Lesum	104
Tab. 5.2.4	Regelwasserstände und Winterabsenkung für die Sieleinzugsgebiete Wasserhorst und Kuhsiel im FGM Lesum	105
Tab. 5.2.5	Abweichungsparameter zwischen simulierten und berechneten Werten der Sieleinzugsgebiete Wasserhorst und Kuhsiel und Abhängigkeit vom Zeitschritt t.....	107
Tab. 6.2.2	Hydraulische Gleichungen für ein Schütz mit Hubtor	117
Tab. 6.5.1	Varianten und Abweichungsparameter am Gebietsauslass ...	130

Tabellen im Anhang

Tab. A1	Verwendete Rechenprozeduren in NAXOS	157
Tab. A2	Modellparameter in NAXOS.....	158
Tab. A3	Landnutzungsklassen nach CORINE Land Cover	161
Tab. A4	Landnutzung und bodengruppenabhängige Curve Numbers der Bodenfeuchtekategorie II	162
Tab. A5	Bodengruppen nach SCS und Typisierung	163
Tab. A6	Funktionen der ArcView-Extension LWI-Tools.....	164
Tab. A7	Wasserbauwerke, Messreihen, Steuerpegel, Betriebs- weisen und Bezeichner im FGM Lesum	165
Tab. A8	Grabenlängen, Grabenstauraum bei bordvollem Abfluss und Gewässerdichte im FGM Lesum.....	166
Tab. A9	Summe der Zu- und Abflüsse im SIELEINZUGSGEBIET Wasser- horst für das Kalenderjahr 1998.....	167
Tab. A10	Summe der Zu- und Abflüsse im Einzugsgebiet des Kuh- siels für das Kalenderjahr 1998.....	167

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	[m ²]	Querschnittsfläche
A ₂	[m ²]	Mittlere Einzugsgebietsgröße eines einzelnen Gewässers der Kategorie 2
A ₃	[m ²]	Mittlere Einzugsgebietsgröße eines einzelnen Gewässers der Kategorie 3
A _{Eo}	[km ²]	Einzugsgebietsgröße eines Querschnittes oder am Auslass einer Teilfläche
A _{effx}	[m ²]	Zum Abfluss beitragende Fläche
A _{Pi}	[m ²]	Fläche des Querprofil für die Kategorie i
A _Q	[m ²]	durchflossene Querschnittsfläche
A _{Tfi}	[km ²]	Flächengröße einer Teilfläche
a	[-]	Variationsexponent, a = 0,73
anto	[-]	Modellparameter für die Aufteilung des Direktabflusses auf den Oberflächenspeicher (0.0 < anto < 1.0)
B _R	[-]	Aktivierung der Rückstromsimulation; 1 = ja; 0 = nein
B _{Thw}	[mNN]	Binnentidehochwasser
B _{Tnw}	[mNN]	Binnentideniedrigwasser
b ₁	[m]	Mittlere Hanglänge, bezogen auf den Hang senkrecht zum Gewässer der Kategorie 1
b ₂	[m]	Mittlere Hanglänge, bezogen auf den Hang senkrecht zum Gewässer der Kategorie 2
b ₃	[m]	Mittlere Hanglänge, bezogen auf den Hang senkrecht zum Gewässer der Kategorie 3
b	[m]	Breite des Querschnitts
b _{Pi}	[m]	Breite des Querprofils i bei bordvollem Abfluss
b _Q	[m]	Breite des durchflossenen Querschnitts
b _{SK}	[m]	Breite der Stauklappe
b _{Ger}	[m]	mittlere Gerinnebreite
b _{Si}	[m]	Breite eines Siels
bofeu	[mm]	Bodenfeuchte; relative Abweichung zum Mittelwert
b _{Tfi}	[m]	Mittlere Breite der Teilfläche $b_{Tfi} = A_{Tfi} / l_H$
CN	[-]	curve number der Bodenfeuchtekategorie II
CN _{bf}	[-]	Bodenfeuchteabhängige curve number als Kennwert der Bodengruppe und -nutzung
C _{tc}	[-]	Beiwert

C_{vs}	[-]	Beiwert
C_e	[-]	Beiwert
C_{rf}	[-]	Beiwert
C_{cd}	[-]	Beiwert
C_d	[-]	Beiwert
C_{vw}	[-]	Beiwert
C_{vg}	[-]	Beiwert
c	[m/s]	Wellenfortpflanzungs-Geschwindigkeit
D	[m ² /s ³]	Diffusions- oder Wellenabflachungskoeffizient
dh	[m]	Wasserstandsdifferenz zwischen zwei Querschnitten bzw. zwischen zwei Speichern
d_{ij}	[m]	Entfernung des Schwerpunktes der Teilfläche j zur Niederschlagsstation i
dL	[m]	Fließlänge zwischen zwei Querschnitten oder zwei Speichern
F	[mm]	Kumulierte Infiltrationsmenge
F_D	[N]	Druckkraft
F_G	[N]	Gewichtskraft
F_R	[N]	Reibungskraft
f	[-]	empirisch ermittelter Annäherungsfaktor $f = 0.1$
f_{spk_o}	[-]	Kalibrierungsfaktor für Oberflächenabfluss
f_{spk_i}	[-]	Kalibrierungsfaktor für Interflow
f_{spk_u}	[-]	Kalibrierungsfaktor für Grundwasserabfluss
f_{spk_G}	[-]	Kalibrierungsfaktor für die Speicherkonstante der Gerinneretention
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung, $g = 9,81$
gw	[m]	Flurabstand zwischen Geländeoberkante und Grundwasserspiegel
h	[m]	Wassertiefe
h_D	[mNN]	Drempelhöhe des Siels
Δh_e	[m]	Höhendifferenz zwischen Energielinie vor dem Siel im Vergleich zum Wasserstand am Sielauslauf
h_g	[m]	Wasserstandsdifferenz zwischen Binnenpeil und Außenpeil
h_o	[m]	Überfallhöhe; Höhendifferenz zwischen Binnenpeil und Überfallkrone
h_{gate}	[m]	Länge einer Stauklappe
h_{Oro}	[m+NN]	Orogr. Höhe, unterhalb der keine Schneedecke vorliegt
$h_{\ddot{O}}$	[m]	Öffnungsdifferenz: Höhendifferenz für Öffnung der Sieltore, um die das Binnenpeil höher als das Außenpeil sein muss
h_{Lam}	[mNN]	mittlere orogr. Höhe einer Lamelle innerhalb einer Teilfläche
h_m	[m]	mittlerer Wasserstand

h_r	[mm]	Verluthöhe
h_{Schnee}	[mm]	Wasseräquivalent der Schneedecke
h_{S0}	[mm]	Orografische Höhe, bei der $T = 0$ und $h_{\text{Schnee}} = 0$ sind
h_{Wi}	[m]	Sollwasserstandsabsenkung im Winterhalbjahr
$h_{\bar{U}}$	[m]	Überfallhöhe; Höhendifferenz zwischen Binnenpeil und Überfallkrone
h_v	[m]	Verluthöhe
h_z	[m]	Sielzugfall; Differenz zwischen BThw und folgendem BTnw
I_a	[mm]	Anfangsverlust / Interceptionsverlust
I_{\max}	[mm]	Maximaler Interceptionsverlust
I_E	[m/m]	Energiegefälle
I_S	[m/m]	Sohlgefälle
I_W	[m/m]	Wasserspiegelgefälle
I_x	[‰]	Sohlgefälle des Gerinnes
I_y	[‰]	Mittleres Hanggefälle
i, j	[-]	Laufvariablen
KS	[-]	Kettenspeicher, ohne Angabe der Kategorie
KS_1	[-]	Teil-Kettenspeicher der Kategorie 1
KS_2	[-]	Teil-Kettenspeicher der Kategorie 2
KS_3	[-]	Teil-Kettenspeicher der Kategorie 3
KS_O	[-]	Bezeichner für Kettenspeicher oberstrom
$KS_{O,i}$	[-]	Bezeichner für Kettenspeicher Nr. i, oberstrom
KS_U	[-]	Kettenspeicher unterstrom
k	[h]	Speicherkonstante
k_t	[-]	Verschiebung bei Kreuzkorrelation
k_{bas}	[h]	Speicherkonstante des Basisabflusses
k_{Obas}	[h]	Speicherkonstante des Basisabflusses für Oberflächenabfluss
k_{Ibas}	[h]	Speicherkonstante des Basisabflusses für Interflow
k_{Ubas}	[h]	Speicherkonstante des Basisabflusses für Grundwasser
k_o	[h]	Speicherkonstante des Oberflächenabflusses
k_i	[h]	Speicherkonstante des Interflow
k_u	[h]	Speicherkonstante des Grundwasserabflusses
k_s	[mm]	Einzelrauheit
k_G	[h]	Speicherkonstante für Gerinneretention
k_{St}	$[m^{1/3}/s]$	Manning-Strickler-Rauheitsbeiwert
$k_{St,j}$	$[m^{1/3}/s]$	Manning-Strickler-Rauheitsbeiwert des Abschnittes j
$k_{St,ges}$	$[m^{1/3}/s]$	Gemittelter Manning-Strickler-Rauheitsbeiwert
ΣL	[mm]	Aufsummierte Verluste
Δl_{UOi}		Mittlere Fließstrecke zwischen Kettenspeicher KS_U und $KS_{O,i}$

l_1, l_2, l_3	[m]	Mittlere Länge der Gewässer der Kategorie 1, 2 oder 3. $l_2 = l_{N1}$ $l_3 = l_{N2}$
l_G	[m]	Längensumme des Gewässernetzes einer Teilfläche $l_G = l_{GH} + l_{GN}$
l_{G1}, l_{G2}, l_{G3}	[m]	Längensumme der Gewässer der Kategorie 1, 2 oder 3
l_{GN}	[m]	Längensumme aller Nebengerinne
l_{GN1}	[m]	Längensumme aller Nebengerinne der 1. Ordnung
l_{GN2}	[m]	Längensumme aller Nebengerinne der 2. Ordnung
l_{GH}	[m]	Längensumme aller Hauptgerinne. $l_{GH} = l_1$
l_H	[m]	Länge eines Hauptgerinnes, entspricht l_1
l_m	[m]	Mittlere Hanglänge
l_{N1}	[m]	Mittlere Länge der Nebengerinne der 1. bzw. 2. Ordnung.
l_{N2}		$l_2 = l_{N1}$ und $l_3 = l_{N2}$
l_{S2}	[m]	Mittlere Entfernung zwischen Speicher KS_2 und KS_1
l_{S3}	[m]	Mittlere Entfernung zwischen Speicher KS_3 und KS_2
l_U	[m]	Benetzter Umfang eines Querprofils
l_{Ui}	[m]	Benetzter Umfang eines Teilabschnitts i
m	[-]	Anzahl der mit einbezogenen Niederschlagsstationen
ΣN	[mm]	Summe des gefallenen Niederschlags
ΣNL	[mm]	Restniederschlagssumme
N	[mm]	Gefallener Niederschlag
N_{eff}	[mm]	Abflusswirksamer Niederschlag
$N_{eff,o}$	[mm]	Abflusswirksamer Niederschlag für den Oberflächenabfluss
$N_{eff,i}$	[mm]	Abflusswirksamer Niederschlag für den Interflow
$N_{eff,u}$	[mm]	Abflusswirksamer Niederschlag für den Grundwasserabfluss
$N_{S,i}$	[mm]	Niederschlagshöhe an der Station i
N_o	[mm]	Niederschlag für Oberflächenabfluss
N_i	[mm]	Niederschlag für Interflow
N_u	[mm]	Niederschlag für Grundwasserabfluss
$N_o(t,z)$	[mm]	Niederschlag für Oberflächenabfluss im Zeitschritt t für jeweils eine Nutzgruppe z
$N_i(t,z)$	[mm]	Niederschlag für Interflow im Zeitschritt t für jeweils eine Nutzgruppe z
$N_u(t,z)$	[mm]	Niederschlag für Grundwasserabfluss im Zeitschritt t für jeweils eine Nutzgruppe z
$N_{Tfi,j}$	[mm]	Gebietsniederschlagshöhe der Teilfläche j
Nr_{Quer}	[-]	Nummer des zugeordneten Querprofils
Nr_{Ref}	[-]	Nummer des Betriebspegels
Nr_{Steu}	[-]	Nummer des Steuerpegels

Nr_{Qab}	[-]	Nummer eines Pegels mit Abflussganglinie
n_i	[-]	Anzahl Kettenspeicher KS_{O_i}
n_s	[-]	Anzahl Sub-Zeitschritte
n_{Stat}	[-]	Anzahl Niederschlagsstationen
n_t	[-]	Anzahl Zeitschritte
n_z	[-]	Anzahl der Nutzgruppen in einer Teilfläche
n_{Siel}	[-]	Anzahl Siele/Hubschütze je Bauwerk
p	[-]	Exponent der Entfernungsgewichtung
Q	[m ³ /s]	Durchfluss
$QA_{(t)}$	[m ³ /s]	Abfluss im Zeitschritt t
$QA_{(t+\Delta t)}$	[m ³ /s]	Abfluss im Zeitschritt $t + \Delta t$
QAm	[m ³ /s]	Mittlerer Abfluss $QAm = (QA_{(t)} + QA_{(t+\Delta t)}) / 2$
$QA_{U(t,s)}$	[m ³ /s]	Abfluss des Kettenspeichers KU im Zeitschritt t bei Sub-Zeitschritt s
$QA_{x(t,s)}$	[m ³ /s]	Abfluss des Kettenspeichers x im Sub-Zeitschritt s des Zeitschrittes t
$QA_{SP,L}$	[m ³ /s]	Landflächenabfluss einer Speicherteilfläche
$Q_{O(t)}$	[m ³ /s]	Basisabfluss des Oberflächenabflussspeichers
$Q_{I(t)}$	[m ³ /s]	Basisabfluss des Interflowspeichers
$Q_{U(t)}$	[m ³ /s]	Basisabfluss des Grundwasserabflussspeichers
Q_{bas}	[m ³ /s]	Konstanter Basisabfluss
$Q_{bas(t)}$	[m ³ /s]	Exponentiell fallender Basisabfluss im Zeitschritt t
Q_{Land}	[m ³]	Landflächenabfluss
Q_{beob}	[m ³ /s]	Gemessener bzw. mit Fließformeln berechneter Abfluss
\overline{Q}_{beob}	[m ³ /s]	Mittelwert aller beobachteten Abflüsse
Q_{sim}	[m ³ /s]	Simulierter Abfluss
\overline{Q}_{sim}	[m ³ /s]	Mittelwert aller simulierten Abflüsse
Qm_{beob}	[m ³ /s]	Mittlerer beobachteter Abfluss $Qm_{beob} = (Q_{beob(t)} + Q_{beob(t+\Delta t)})/2$
Qm_{sim}	[m ³ /s]	Simulierter Abfluss $Qm_{sim} = (Q_{sim(t)} + Q_{sim(t+\Delta t)}) / 2$
Q_x	[m ³ /s]	x -jährlicher Scheitelabfluss
$QZ_{(t)}$	[m ³ /s]	Zufluss im Zeitschritt t
$QZ_{(t+\Delta t)}$	[m ³ /s]	Zufluss im Zeitschritt $t + n\Delta t$
QZm	[m ³ /s]	Mittlerer Zufluss $QZm = (QZ_{(t)} + QZ_{(t+\Delta t)}) / 2$
$QZ_{U(t,s)}$	[m ³ /s]	Zufluss um Kettenspeicher KU im Zeitschritt t bei Sub-Zeitschritt s
QZ_{KSi}	[m ³ /s]	Zufluss um Kettenspeicher KS der Grabenkategorie i
q_{bas}	[l/s km ²]	Basisabflussspende
q_{Obas}	[l/s km ²]	Basisabflussspende für den Speicher für Oberflächenabfluss
q_{Ibas}	[l/s km ²]	Basisabflussspende für den Speicher für Interflow

q_{Ubas}	[l/s km ²]	Basisabflussspende für den Speicher für Grundwasser
q_{bofeu}	[mm/h]	Aufsättigung der Bodenfeuchte aus Niederschlag
q_{Tfl}	[mm/h]	Teilflächenabfluss, umgerechnet in [mm/h]
R^2	[-]	Abweichung nach Nash-Sutcliffe
Re	[-]	Reynoldszahl
r	[-]	Korrelationskoeffizient
r_k	[-]	Kreuzkorrelationskoeffizient
$r(r_k)$	[-]	Korrelationskoeffizient nach Verschiebung um r_k
r_{hy}	[m]	hydraulischer Radius
r_{max}	[m]	Maximaler Suchradius bei der inversen Distanz-Wichtung
$r_{x,TRx}$	[m]	Bemessungsregen bei kritischer Regendauer TR_x
$S_{max,z}$	[mm]	Maximal mögliche Infiltration für eine Nutzgruppe z
S_{KSi}	[m ³]	Speicherinhalt für den Speicher der Kategorie i
S_L	[mm]	Verlustspeicherinhalt
S_{Lmax}	[mm]	Max. Inhalt des Verlustspeichers
$S_{Oi(t)}$	[m ³]	Speicherinhalt des i-ten oberstrom liegenden Kettenspeichers KO_i
S	[m ³]	Speicherinhalt
S_{cn}	[mm]	Speicherinhalt des Bodenspeichers mit der Curve Number cn
$S_{cn,bf}$	[mm]	Speicherinhalt des Bodenspeichers mit der Curve Number cn und der Bodenfeuchte bf
S_{KU}	[m ³]	Speicherinhalt des Kettenspeichers KS_U
S_{KOi}	[m ³]	Speicherinhalt des Kettenspeichers KS_{Oi}
Sz	[m ³]	Sielzugmenge
ΔS	[m ³]	Speicherinhaltsänderung während eines Zeitschrittes
s	[-]	Sub-Zeitschritt
$s(Qt_{sim})$	[-]	Standardabweichung einer simulierten Abflussganglinie
$s(Qt_{beob})$	[-]	Standardabweichung einer beobachteten Abflussganglinie
s_x	[-]	Standardabweichung
Δt	[h]	Rechenschrittweite, kann < 1 h sein
t	[-]	Zeitschritt als Index
(t,s)	[-]	Sub-Zeitschritt s innerhalb eines Zeitschrittes t
$(t+\Delta t)$	[h]	Zeitschritt t um Rechenschrittweite Δt verschoben
t_c	[h]	Konzentrationszeit
t_x	[h]	Fließzeit im Hauptgerinne
t_O	[min]	Öffnungsdauer der Sielstemmtore
t_{Kmin}	[min]	minimale Haltedauer der Klappenstellung
t_y	[h]	Fließzeit auf der Landfläche
v	[m/s]	Mittlere Fließgeschwindigkeit am Querschnitt
V	[mm]	Aktuelle Evapotranspiration

V_a	[mm]	Höhe der jährlichen aktuellen Evapotranspiration
V_{beob}	[m ³]	Gemessenes Abflussvolumen
V_{Land}	[m ³]	Volumen des Landflächenabflusses in einem Zeitschritt
V_{sim}	[m ³]	Berechnetes Abflussvolumen
VZ_{Ger}	[m ³]	Volumen des Gerinnezuflusses in einem Zeitschritt
$VZ_{\text{Ger}+1}$	[m ³]	Volumen des Gerinnezuflusses in einem Zeitschritt, welches im aktuellen Zeitschritt über das Teilflächengerinne hinaus in die Folgefläche entwässert
v_1	[m/s]	Fließgeschwindigkeit im Sieltief
v_2	[m/s]	Fließgeschwindigkeit im Siel
v_{x0}	[m/s]	Bezugsgröße der Fließgeschwindigkeit
v_y	[m/s]	Mittlere Fließgeschwindigkeit auf dem Hang
W_a	[mNN]	Außenwasserstand (Außenpeil)
W_b	[mNN]	Binnenwasserstand (Binnenpeil)
W_m	[cm]	Mittlere Abweichung zwischen simulierten und beobachteten Wasserständen
W_{sim}	[mNN]	Simulierter Wasserstand
W_{beob}	[mNN]	Beobachteter Wasserstand
W_O	[mNN]	Wasserstand eines Kettenspeichers oberstrom
W_{O_i}	[mNN]	Wasserstand des i-ten Kettenspeichers oberstrom KS_{O_i}
W_{T_j}	[mNN]	Wasserstand einer Teilfläche j ohne Kettenspeicher
W_U	[mNN]	Wasserstand des unteren Kettenspeichers KS_U
W_R	[mNN]	Wasserstand der unteren Randbedingung
W_{Soll}	[mNN]	Sollwasserstand / Meliorationswasserstand am Betriebspegel
W_{Start}	[mNN]	Anfangswasserstand eines Kettenspeichers
w_{ij}	[-]	Gewichtung der Niederschlagsstation i zur Teilfläche j
x	[m]	Ortsvariable in Fließrichtung
y_1	[mNN]	Wasserstand oberhalb
y_2	[mNN]	Wasserstand unterhalb
y_0	[mNN]	Oberkante der Stauklappe
Z_c	[m]	Sohlhöhe der Stauklappe in der aktuellen Stellung
Δx	[m]	Abstand in Fließrichtung
α	[-]	Kontraktionskoeffizient
Θ	[-]	Koeffizient
Φ	[-]	Koeffizient
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Wassers
μ	[-]	Dimensionsloser Beiwert
λ	[-]	Rohrreibungsbeiwert

1 Einleitung und Problemstellung

Die Wasserwirtschaft in tief liegenden, tidebeeinflussten Einzugsbieten ist durch künstliche Entwässerung mit Sielbauwerken, Schöpfwerken und ein dichtes Grabensystem geprägt. Unter dem Einfluss eines zu erwartenden Meeresspiegelanstiegs müssen geeignete Maßnahmen zur Kompensation der verschlechterten natürlichen Entwässerung sowie zum Schutz des tief liegenden Binnenlandes und der Bevölkerung entworfen werden. Die Nachhaltigkeit derartiger Maßnahmen kann durch Simulationsrechnungen geprüft werden. Geeignete Modelle müssen den Wasserhaushalt der Landoberfläche, die Zwischenspeicherung im Flussgebiet, die Betriebsweise der Siele und Schöpfwerke sowie rückstaubeeinflusste Abflüsse und Wasserstände simulieren können.

Bisher erfolgt die Berechnung instationärer, rückstaubeeinflusster Abflüsse und Wasserstände überwiegend mittels hydraulisch-numerischer Modelle (HN-Modelle), für die Abflussganglinien als Randbedingungen vorgegeben werden müssen. Die Abflussganglinien werden durch Pegelaufzeichnungen oder Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) bereitgestellt. Wegen des hohen Rechenaufwandes und der aufwändigen Parametrisierung sind hydrodynamisch-numerische Verfahren für die Simulation ganzer Flussgebiete wenig geeignet, so dass sich das Einsatzgebiet von HN-Modellen i. d. R. auf Gewässerabschnitte beschränkt. Für die operationelle Simulation mit HN-Modellen müssten diese mit N-A-Modellen gekoppelt werden. Dies ist in der Praxis arbeitsaufwändig und selten, weil die meisten Modelle stand-alone-Programme sind und geeignete Schnittstellen nicht bestehen. Die Kopplung der Modelle gehört daher noch nicht zum Standard.

N-A-Modelle berechnen Abflüsse aus Niederschlägen und werden zur Ermittlung kennzeichnender Abflüsse für Hochwasserschutz, Niedrigwasser, Talsperrensteuerung und Wasserversorgung in Flussgebieten eingesetzt. Bei geringem Fließgefälle und bei Tideeinfluss liegen jedoch wechselnde Rückstauverhältnisse vor, die die Zahl geeigneter Rechenansätze für die Simulation des Wellenablaufes einschränken. Die in N-A-Modellen häufig verwendeten hydrologischen Modellansätze zur Abflussberechnung stellen Vereinfachungen gegenüber der Berechnung mit hydrodynamisch-numer-

ischen Gleichungen dar. Dadurch sind höhere Rechengeschwindigkeiten und eine einfachere Parametrisierung möglich. Die Simulation von Abflüssen mit hydrologischen Modellansätzen erfolgt durch die Erfassung des Gebietsrückhalts in Speichern. Der Abfluss ist dabei meist eine zeitinvariante Funktion des Speicherinhalts. Der Rückstau einfluss in tidebeeinflussten Einzugsgebieten kann mit hydrologischen Verfahren berücksichtigt werden, wenn die Abflusskurven der Speicher zeitvariant sind und neben dem Speicherinhalt zusätzlich das Wasserspiegelgefälle in die Abflussberechnung einbeziehen.

N-A-Modelle arbeiten mit räumlich verteilten Parametern und Eingangsdaten. Der hohe Zeit- und Personalaufwand zur Bearbeitung der Rohdaten erschwert jedoch die Anwendung dieser Modelle. Geografische Informationssysteme (GIS) erlauben die Verwaltung und Bereitstellung der raumbezogenen Eingangsdaten. Heute liegen bereits von vielen Regionen flächendeckend GIS-Daten für Topografie, Landnutzung, Boden usw. vor. Wenn GIS-Eingangsdaten vom Modell selbst verarbeitet und nicht durch Modellanwender in Parameter umgerechnet werden müssen, ist die Ermittlung von Gebietskennwerten und Modellparametern beschleunigt und standardisiert. Diese Standardisierung trägt zur Verringerung der Schwankungsbereite von Modellparametern bei, die bisher nicht direkt aus Gebietskennwerten abgeleitet werden können und daher kalibriert werden müssen. Hierdurch wird eine bessere regionale Übertragbarkeit der verbliebenen, von Modellanwendern vorzugebenden Modellparameter in Aussicht gestellt.

Operationelle Simulationsmodelle, die für Einzugsgebiete den Wasserhaushalt und die komplexe Entwässerung eines Gewässernetzes im Rückstau mit Sielen und Schöpfwerken mit hydrologischen Rechenansätzen bei einer engen zeitlichen Auflösung simulieren, sind aus der Literatur nicht bekannt. Es besteht daher Forschungsbedarf für die Entwicklung von Modellansätzen und Verfahren, die im Einzugsgebietsmaßstab ohne aufwändige Modellkalibrierung für die Simulation des tidebeeinflussten Wasserhaushaltes eingesetzt werden können.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines hydrologischen Verfahrens zur Berechnung rückstaubeeinflusster Abflüsse und Wasserstände in mesoskaligen Flussgebietsmodellen unter Verwendung von regionalisierten Parametern. Die vom Verfasser für diesen Zweck entwickelten Gleichungen und Arbeitsschritte werden unter dem Begriff „Kettenspeicheransatz“ zusammen-

gefasst. Für die Modellanwendung werden die Gleichungen in das vom Verfasser entwickelte, GIS-basierte N-A-Modell NAXOS eingebunden. Speicherinhaltslinien für Flussabschnitte werden anhand eines digitalen Höhenmodells, einem digital vorliegenden Gewässernetz und Querprofilen ermittelt. Hierfür sind in NAXOS Funktionen integriert. Die räumliche Reihenfolge der Abarbeitung erfolgt entlang der Hauptfließrichtung von der Wasserscheide zum Auslass. Für die Simulation von Wasserbauwerken wie Sielen und Schöpfwerken sind Betriebsregeln zu übernehmen. Der in Tidegebieten auftretende Abfluss entgegen der Hauptfließrichtung wird berücksichtigt. Die Rauheit nach Strickler ist neben geometrischen Größen wie Länge, Breite und Tiefe der Gewässer der einzige Kalibrierungsparameter für Ketten-speicher, so dass dieser Ansatz auf andere Flussgebiete leicht übertragbar ist.

Die Berücksichtigung des Gewässernetzes bei der Simulation der Abflusskonzentration ist ein weiteres Ziel dieser Untersuchung. Das Gewässernetz wird bei der Modellierung in Abhängigkeit vom verwendeten Maßstab unterschiedlich stark generalisiert, wodurch Informationen verloren gehen. Das Gewässernetz wird beim Abflusskonzentrationsansatz des Verfassers im Parameter Gewässerdichte ausgedrückt. Abflüsse werden getrennt nach Landphase und Gerinnephase berechnet. Der Einfluss der Raumskala auf die Abflussprozesse in der Landphase wird dadurch verringert.

Am Beispiel der tidebeeinflussten Einzugsgebiete Käseburger Siel (ca. 72 km²) und Lesum (ca. 2 200 km²) soll die Anwendbarkeit des Ketten-speicheransatzes bzw. des Modells NAXOS gezeigt werden. Für den Unterlauf des Hauptsieltiefs in Flussgebietsmodell Lesum wird eine Vergleichsrechnung mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell ISIS durchgeführt, um die leichtere Anwendbarkeit des Ansatzes des Verfassers mit guten Simulationsergebnissen zu belegen.

2 Niederschlag-Abfluss-Modell NAXOS

Das vom Verfasser entwickelte Programm NAXOS ist ein deterministisches Niederschlag-Abfluss-Modell (N-A-Modell). Es handelt sich dabei um ein konzeptionelles Modell mit einer physikalisch basierten Struktur zur Simulation der hydrologischen Teilprozesse, die zum Abfluss führen. Hydrologische Teilprozesse werden nach der klassischen Vorstellung in Abflussbildung (mit Berücksichtigung von Schnee und Verdunstung), Abflusskonzentration und Wellenverformung (flood routing) untergliedert. Die räumliche Gliederung umfasst Teilflächen (Teileinzugsgebiete), Gerinne und Speicherbecken.

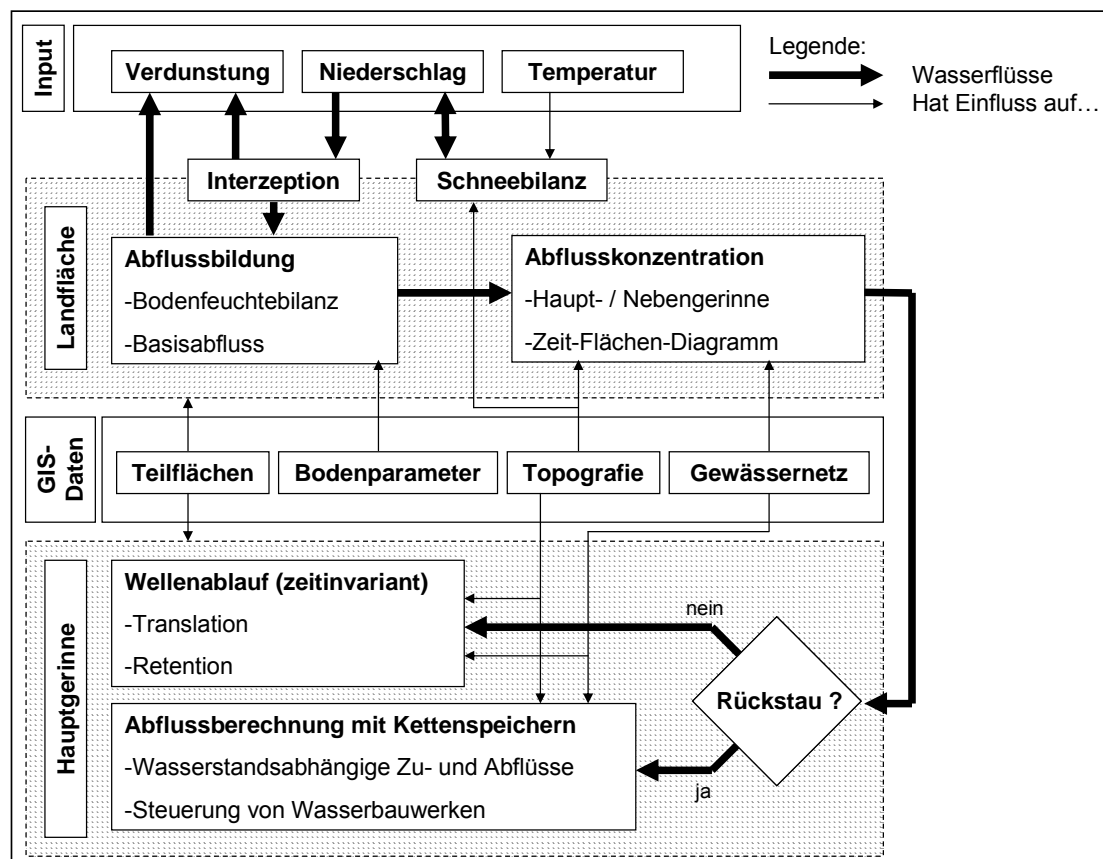


Abb. 2.1.1 Hydrologische Prozesse und Einflussgrößen im N-A-Modell NAXOS

Bei hydrologischen Modellierungen werden drei Skalenbereiche Mikroskala, Mesoskala und Makroskala differenziert. Für jede Skala werden zweckmäßigerweise unterschiedliche Arbeitsmethoden, Modelle und Lösungs-

techniken angewendet. Die Skaleneinteilungen stellen nur eine grobe Diskretisierung ohne Angabe absoluter Größen dar und variieren mit dem Anwendungsgebiet, da z. B. für Klimamodelle andere Skaleneinteilungen als für Flussgebietsmodelle gelten (Becker, in: DFG, 1992, S. 19; Maniak, in: BFG, 1999, S. 25). NAXOS ist für die hydrologische Mesoskala konzipiert, die Flächengrößen zwischen ca. 1 ha und 100 km² umfasst. Mit mehreren Teileinzugsgebieten ist die Größe von Untersuchungsgebieten nicht begrenzt kann weit über 1 000 km² betragen.

Die raumbezogenen Eingangsdaten werden mit dem Geografischen Informationssystem (GIS) ArcView der Fa. ESRI aufbereitet und in Dateien des ESRI-Shape-Formats oder als Rasterdatei gespeichert. Das Modell wurde bereits für die Berechnungen unterschiedlich langer Zeiträume zwischen Hochwasserereignissen seltener Eintrittswahrscheinlichkeit bis hin zu Abflussjahren erfolgreich eingesetzt. Es bildet die Programmbasis für die in dieser Untersuchung vorgestellten Simulationsansätze.

Bei der Simulation der Teilprozesse werden *Ortschritte* und *Zeitschritte* unterschieden. NAXOS ist ein Zeitschrittmodell, d. h. es werden innerhalb jedes Zeitschrittes *t* alle Ortsschritte, d. h. alle Teilflächen von der Wasserscheide bis zur Mündung, abgearbeitet. Diese Abarbeitungsreihenfolge erlaubt die Berücksichtigung der Rückstaueffekte von Flussabschnitten im Unterwasser. Die Rechenschrittweiten können in Intervallen von 3, 6, 15, 30 und 60 Minuten variiert werden.

Im Folgenden werden Programmoberfläche, Rechenansätze, Hilfsfunktionen und allgemeine Vorgehensweisen vorgestellt, die für die Abflussberechnung bei Rückstau einfluss von Bedeutung sind. Die Formate der zugehörigen Eingangsdaten sind im Anhang aufgeführt.

2.1 Modelloberfläche (User Interface)

Das Modell NAXOS ist vollständig grafisch interaktiv gestaltet, d. h. alle Modifikationen von Modellparametern und alle Eingaben können von der Programmoberfläche aus durchgeführt werden. Die für eine Simulation benötigten Eingangsdateinamen werden in einer Organisationsdatei verwaltet, die auch alle Rechenlaufoptionen enthält. Das Ereignisfenster, welches die Zeitreihen verwaltet und menügeführt die Steuerung aller grafischen

Ausgaben und Rechenlaufoptionen ermöglicht, ist das Hauptinteraktionsfenster für den Benutzer.

Die Programmoberfläche (Abb. A1 im Anhang) verwaltet Programmfenster für die Organisationsdatei, Ganglinien (mehrere Fenster), Modellparameter sowie Geodateien wie Raster und Shapefiles. Jedes dargestellte Fenster entspricht einer eingelesenen oder berechneten Datei (Dokument) und kann einzeln eingelesen und dargestellt werden.

2.2 Ermittlung von Gebietskennwerten aus GIS-Dateien

Bis etwa zum Anfang der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts nutzten N-A-Modelle Geografische Informationssysteme (GIS) nicht. Stattdessen wurden integrale, über große Flächen gemittelte Eingabedaten verwendet (Kleeberg, 1992). Heute liegen von vielen Regionen flächendeckend GIS-Daten für Topografie, Landnutzung, Boden usw. vor. Es werden Rasterdaten und Vektordaten unterschieden. GIS erlauben die Verwaltung, Darstellung und Auswertung von raumbezogenen Informationen. Mit ihrer Hilfe können Eingangsdaten für N-A-Modelle verwaltet und mittels Hilfsfunktionen auch Rohdaten aufbereitet bzw. parametrisiert werden.

Für einen beschleunigten Modellaufbau und Standardisierung von Modellparametern können mit dem Modell NAXOS GIS-Dateien weiterverarbeitet werden. Die Verarbeitung der digitalen Karten mit dem Modell anstelle der Übernahme großflächig gemittelter Parameter trägt zur Verringerung der Schwankungsbereite von Modellparametern bei, weil benutzerabhängig unterschiedliche Interpretationen gleicher Rohdaten ausgeschlossen werden. Hierdurch wird eine bessere regionale Übertragbarkeit der verbliebenen, vom Modellanwender vorzugebenden und zu kalibrierenden Modellparameter in Aussicht gestellt.

Die aus analogen oder digitalen Karten ableitbaren Gebietskennwerte für das Modell NAXOS umfassen:

- Geometrie (Flächengröße, Fließlänge, Flächen- und Gerinnegefälle),
- Bodenparameter (Landnutzung, Bodengruppe nach SCS),
- Koordinaten für Teilflächen und Messstationen (Pegel, Niederschlagsstationen).

Die Numerierung der Teilflächen und Messstationen sowie die Entwässerungsreihenfolge muss manuell vorgenommen werden. Rechenanweisungen (Prozeduren) werden nicht aus Karten abgeleitet, aber zu den Gebietskennwerten gezählt, weil für jede Rechenanweisung gebietsspezifische Modellparameter vorgegeben werden müssen.

Als Schnittstelle zwischen NAXOS und dem GIS wurde die ArcView-Extension LWI-Tools entwickelt (Mücke, Riedel, 2001), mit der tabellarische Simulationsergebnisse von NAXOS wie Modellvariablen, berechnete Bilanzen und rasterbasierte Simulationsergebnisse wie Überschwemmungskarten in das GIS ArcView exportiert und dort visualisiert werden können (s. Tab. A5 im Anhang).

Für die Verarbeitung von Rasterdaten wird zusätzlich auf das ArcView-Zusatzmodul „Spatial Analyst“ zugegriffen. Einige GIS-Funktionen, die für die Aufbereitung von Eingangsdaten für die N-A-Modellierung häufig verwendet werden, wurden zur Vereinfachung und Vereinheitlichung des Datenimports in das Modell NAXOS integriert. Sie sind in Tab. 2.2.1 zusammengefasst. Die Ermittlung von Speicherinhaltslinien aus GIS-Dateien ist in Kap. 3.3 gesondert beschrieben.

Tab. 2.2.1 In NAXOS integrierte GIS-Funktionen mit Funktionsbeschreibung, abgeleiteten Kennwerten und Parametern
(Teilflächen, Gewässernetz, Landnutzung und Bodenarten sind ESRI-Shapefiles; das digitale Höhenmodell DHM ist eine Rasterdatei)

Gebietskennwerte bzw. Parameter	Quelldaten aus GIS	Beschreibung der in NAXOS integrierten Funktion
Flächengefälle	Teilflächen und DHM	a) Berechnung des Gefälles jeder Rasterzelle b) Verschneidung der Teilflächen mit dem Gefälle und Berechnung der mittleren Teilflächengefälle
Fließlänge des Hauptgerinnes; Fließgefälle des Hauptgerinnes; Durchgängigkeit des Gewässernetzes; Gewässerdichte	Gewässernetz	a) Prüfung der Durchgängigkeit des Gewässernetzes von der Wasserscheide bis zum Auslass für jede Teilfläche b) Summierung der Fließlängen der ggf. durch Knoten getrennten Hauptgerinne c) Aufsummierung der Nebengewässerfließlängen und Berechnung der Gewässerdichte
Gerinnegefälle	Teilflächen, DHM und Gewässernetz	Interpolation der Höhen des DHM an den Gewässerknoten und Berechnung des mittleren Fließgefälles des Hauptgerinnes
Hypsografische Kurve	DHM	Berechnung einer hypsografischen Kurve für jede Teilfläche und Generalisierung mittels des integrierten Douglas-Peucker-Algorithmus
Speicherinhaltslinien für Kettenspeicher	Teilflächen, Gewässernetz und DHM	a) Berechnung der hypsografischen Kurve für jede Teilfläche (s. Kap. 3.3) b) Kombination der hypsografischen Kurve mit den aus den Grabenlängen und -querschnitten abgeleiteten Volumina zur Speicherinhaltslinie des Gewässernetzes
Curve Numbers des modifizierten SCS-Verfahrens	Landnutzung, Bodenarten	a) Verschneidung von Landnutzung und Boden- gruppe wird im GIS durchgeführt b) Zusammenfassung der verschnittenen Polygone zu Nutzgruppen gleicher Landnutzung und Bodenart
Zuordnung Teilflächen zu Niederschlagsstationen	Teilflächen, Niederschlagsdatei GGN mit Koordinaten der Stationen	Mittels inverser Distanzwichtung (IDW) werden ggf. für jeden Rechenschritt für jede Teilfläche die nächstgelegenen Niederschlagsstationen ohne Datenausfall ermittelt und der Gebietsniederschlag berechnet

2.3 Zeitreihen und Zuordnung zu Teilflächen

2.3.1 Eingangsdaten

NAXOS kann äquidistante Zeitreihen und unregelmäßige Terminablesungen verarbeiten. Folgende Zeitreihen werden im Modell unterschieden und können grafisch ausgegeben werden:

- Niederschlag, getrennt nach:
 - Stationsniederschlag,
 - Gebietsniederschlag;
- Abfluss, getrennt nach:
 - Abfluss im Gerinne,
 - Zufluss, Abfluss und geförderter Abfluss bei Speicherbecken;
- Wasserstand;
- Fracht (gelöste Stoffe, Schwebstoff aus Erosion);
- Temperatur;
- Verdunstung;
- Anfangs-Schneehöhe.

Abflüsse, Wasserstände und Fracht werden Pegeln (Abflussquerschnitten) zugeordnet, die in Teilflächen liegen. Jedes Speicherbecken im Modell weist eine Pegelnummer auf.

Niederschlag, Temperatur, Verdunstung und Anfangsschneehöhe sind Stationsdaten, die nicht einzelnen Teilflächen zugeordnet werden. Die Zuordnung zwischen Teilfläche und Niederschlagsstation ist in Kap. 2.3.2 beschrieben. Liegt mehr als eine Temperaturganglinie vor, werden die Temperaturen der Stationen für jeden Zeitschritt zu einer mittleren Gebietstemperatur umgerechnet. Aus der ggf. vorgegebenen Anfangsschneehöhe einzelner Stationen kann mittels Regression eine Abhängigkeit zwischen Schneehöhe und orografischer Höhe abgeleitet werden. Mit der Regressionsgleichung wird für alle Teilflächen und deren Höhenlamellen eine Anfangsschneehöhe berechnet (s. Kap. 2.5.1). Die Datenformate der Zeitreihendateien sind im Anhang 1 aufgeführt. Ausgaben sind optional als ASCII-Datei oder als dbase-Datei möglich.

2.3.2 Berechnung des Gebietsniederschlags

Die Berechnung des Gebietsniederschlags wird mittels der Rechenprozedur „Inverse Distanzwichtung“ (IDW) durchgeführt. Die Niederschläge der nächstgelegenen Niederschlagsstationen werden dabei mit der inversen Entfernung zum Teilflächenschwerpunkt gewichtet. Die Entfernungen können mittels des Exponenten p unterschiedlich stark gewichtet werden. Bei Ausfallzeiten von Niederschlagsstationen werden ggf. für jeden Rechenzeitschritt neue Entfernungsgewichtungen für die verbliebenen Niederschlagsstationen berechnet.

Die Parameter für die Inverse Distanzwichtung sind:

- maximaler Suchradius r_{\max} ,
- maximale Anzahl an Stationen n_{Stat} ,
- Exponent der Entfernungsgewichtung p .

Die Festlegung der Parameter kann für jede Teilfläche einzeln erfolgen. Abb. 2.3.1 zeigt zwei Beispiele für eine Zuordnung nach der Anzahl von Niederschlagsstationen (links) und einem maximalen Suchradius um den Teilflächenschwerpunkt. Der Gebietsniederschlag $N_{\text{Tfl},j}$ einer Teilfläche berechnet sich bei i Niederschlagsstationen aus der (Sheppard'schen) Gleichung :

$$N_{\text{Tfl},j} = \sum_{i=1}^{n_{\text{Stat}}} w_{ij} \cdot N_i \quad (2.3.1)$$

mit

$$w_{ij} = \frac{(1/d_{ij}^p)}{\sum_{i=1}^{n_{\text{Stat}}} (1/d_{ij}^p)}$$

mit

$N_{\text{Tfl},j}$:	Gebietsniederschlagshöhe der Teilfläche j	[mm]
N_i :	Niederschlagshöhe der Station i	[mm]
w_{ij} :	Wichtung der Niederschlagsstation i zur Teilfläche j	[-]
n_{Stat} :	Anzahl Niederschlagsstationen	[-]
d_{ij} :	Schwerpunktentfernung der Teilfläche j zur Niederschlagsstation i	[m]
p :	Exponent der Entfernungsgewichtung	[-]

Für Suchradius $r = 0$ und Anzahl Stationen $n_{\text{Stat}} = 1$ erfolgt die Zuordnung der Stationen zu den Teilflächen analog der Thiessen-Methode.

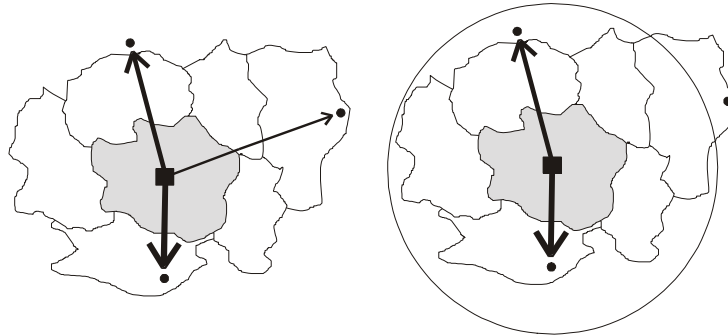


Abb. 2.3.1 Beispiel für die Zuordnung zu Niederschlagsstationen beim IDW-Verfahren

Links: Suche der drei nächstgelegenen Stationen.

Rechts: Suche über den Radius r_{max} .

Die Pfeilstärke gibt die relative Wichtung der Niederschlagsstation wieder

2.4 Übereinstimmungsparameter

Für eine Reihe von Teilprozessen bzw. Rechenansätzen in NAXOS werden Parameter zum Kalibrieren benötigt. Die in dieser Untersuchung verwendeten Rechenansätze sind in Tab. A1 und die Modellparameter in Tab. A2 im Anhang enthalten.

Die in den Rechenansätzen von NAXOS enthaltenen Modellparameter können mittels der interaktiven Programmoberfläche vom Programmbenutzer für jeden Rechenlauf verändert werden. Für die Modellkalibrierung kann NAXOS die simulierten Abflussganglinien des letzten und des vorangegangenen Rechenlaufes gleichzeitig darstellen, so dass die Auswirkungen geänderter Modellparameter auf die Abflussganglinie visuell und anhand statistischer Übereinstimmungsparameter beurteilt werden können. Die Programmoberfläche für die Modellparameter ist untergliedert in:

- Standard N-A-Simulation (Abflussbildung, -konzentration, Basisabfluss, Translation, Gerinneretention, Verdunstung);
- Simulation von Speicherbecken:
 - Modified-Puls-Method,
 - Regelabgabe,
 - unterwassergesteuerte Abgabe,
 - 2-Stufen-Retention;
- Kettenspeicheransatz;
- Parameter von Wasserbauwerken für den Kettenspeicheransatz;
- Querprofile;
- Stofftransport und Erosionsberechnung;
- Berechnung des Gebietsniederschlages;
- Abflusskurven;
- Schneesimulation.

Die in dieser Untersuchung verwendeten statistischen Parameter zur Beschreibung des Grads der Abweichung zwischen Rechenergebnis und Naturmessung sind:

Abweichung nach Nash und Sutcliffe R^2 (R^2 ist 0 wenn $Q_{beob} = Q_{sim}$)

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^{t=n_t} (\bar{Q}_{beob} - Q_{beob,t})^2 - \sum_{t=1}^{t=n_t} (Q_{sim,t} - Q_{beob,t})^2}{\sum_{t=1}^{t=n_t} (\bar{Q}_{beob} - Q_{beob,t})^2} \quad (2.4.1)$$

Korrelationskoeffizient r ($0 < r < 1$)

$$r = \frac{(Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})(Q_{beob,t} - \bar{Q}_{beob})}{s_x(Q_{sim}) s_x(Q_{beob})} \quad (2.4.2)$$

Kreuzkorrelation r_k

(bei $r_k = 0$ sind die Reihen Q_{sim} und Q_{beob} nicht gegeneinander verschoben)

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n_t - k_t} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})(Q_{beob,t+k_t} - \bar{Q}_{beob})}{s_x(Q_{sim}) s_x(Q_{beob})(n_t - k_t)} \quad (2.4.3)$$

Zusätzlich wird bei den simulierten und beobachteten Wasserständen die mittlere Wasserstandsabweichung W_m angegeben:

$$W_m = \frac{\sum_{t=1}^{t=n_t} |W_{\text{sim},t} - W_{\text{beob},t}|}{n_t} \quad (2.4.4)$$

mit:

$$s_x: \quad \text{Standardabweichung } s_x = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{t=n_t} (x_t - \bar{x})^2}{n_t}}$$

t:	Zeitschritt	[-]
n_t :	Anzahl Zeitschritte	[-]
k_t :	Verschiebung bei Kreuzkorrelation	[-]
Q_{sim} :	Simulierter Abfluss	[m³/s]
Q_{beob} :	Gemessener Abfluss	[m³/s]
$\overline{Q}_{\text{beob}}$:	Mittelwert aller beobachteten Abflüsse	[m³/s]
$\overline{Q}_{\text{sim}}$:	Mittelwert aller simulierten Abflüsse	[m³/s]
W_{sim} :	Simulierter Wasserstand	[mNN]
W_{beob} :	Gemessener Wasserstand	[mNN]

Für die Ermittlung einer zeitlichen Verschiebung zwischen simulierten und beobachteten Ganglinien wird von NAXOS der maximale Korrelationskoeffizient $r(r_k)$ berechnet, der sich nach einer Verschiebung der beobachteten Ganglinie um r_k Intervalle einstellt.

2.5 Hydrologische Prozesse

2.5.1 Abflussbildung

Die Abflussbildung beschreibt die Aufteilung des Gebietsniederschlags in zwei oder mehrere, unterschiedlich schnelle Abflusskomponenten. Bei der Hochwassersimulation wird häufig nur eine Direktabflusskomponente für die

Entstehung einer Hochwasserganglinie simuliert. Bei der Langfristsimulation müssen dagegen auch die langsameren Abflusskomponenten detaillierter berücksichtigt werden.

Für die Berechnung der Abflussbildung wird das SCS-Verfahren (Soil Conservation Service, 1982) in einer z. T. vom Verfasser modifizierten Form eingesetzt. Die Modifikationen erlauben eine variable Vorgabe des Anfangsverlustes und der Anfangsbodenfeuchte. Die Direktabflusskomponente wird durch den Kalibrierungsparameter anto in Oberflächenabfluss und Interflow aufgeteilt. Durch Bilanzierung der relativen Bodenfeuchte über die gesamte Rechendauer anhand Niederschlag, Abfluss und Verdunstung und die Einführung eines Verlustterms für Abtrocknungsphasen können mit dem Verfahren auch Langfristsimulationen durchgeführt werden. Die aktuelle Verdunstung und Stationstemperaturen für die Schnee-berechnung können als Ganglinie eingelesen werden.

Kombinationen aus einer Landnutzung und einer Bodengruppe nach dem SCS-Verfahren (Buchstaben A bis D, vgl. Tab. A5 im Anhang) werden als *Nutzgruppe* bezeichnet. Innerhalb einer Teilfläche können mehrere Nutzgruppen z verwaltet werden. Für jede Nutzgruppe wird der abflusswirksame Niederschlag $N_{\text{eff},z}$ einzeln berechnet.

Der Gebietsniederschlag $N_{\text{Tfl},j}$ einer Teilfläche j wird automatisiert anhand der Koordinaten des Teilflächenzentrums und der Niederschlagsstationen mittels inverser Distanzwichtung (s. Kap. 2.3.2) berechnet.

Das SCS-Verfahren basiert auf der Gleichung:

$$N_{\text{eff}} = \frac{(\Sigma N - I_a)^2}{(\Sigma N - I_a) + S_{\text{cn}}} \quad \text{wenn } N > I_a . \quad (\text{Gl. 2.5.1})$$

mit

N_{eff} :	Effektiver Niederschlag	[mm]
ΣN :	Summe des gefallen Niederschlags	[mm]
I_a :	Anfangsverlust	[mm]
CN:	Curve Number CN der Bodenfeuchtekategorie II	[mm]
S_{cn} :	Speicherinhalt des Bodenspeichers mit CN	[mm]

Der Anfangsverlust I_a wird als Verlusthöhe in mm angegeben. In NAXOS sind curve numbers (CN-Werte) für 40 Nutzgruppen vordefiniert (s. Tab. A4 im Anhang). Die Angaben entstammen der weiterführenden Literatur, z. B. DVWK-Regel 113 (DVWK, 1984). Der CN-Wert wird mit der relativen Bodenfeuchte $bofeu$ zur bodenfeuchteabhängigen curve number CN_{bf} , um trockenere oder feuchtere Zustände als das Mittel zu repräsentieren.

$$CN_{bf} = \frac{1000}{\frac{1000}{CN} - \frac{bofeu}{25,4}} \quad (Gl. 2.5.2)$$

mit

CN_{bf} : Bodenfeuchteabhängige curve number [-]

Der Anfangswert der relativen Bodenfeuchte ist ein Kalibrierungsparameter und wird vorgegeben. Ist $bofeu > 0$, spiegelt dies feuchtere Verhältnisse als das Mittel wieder. Die Bodenfeuchte wird in jedem Rechenzeitschritt mit effektivem Niederschlag, Verdunstung, Bodenfeuchteaufsättigung und Flächenabfluss bilanziert. Die relative Bodenfeuchte wird durch Niederschlag erhöht und durch Abfluss und Verdunstung reduziert.

$$bofeu_{(t)} = bofeu_{(t-1)} + N_{eff(t)} - (q_{Tfl(t)} + q_{bofeu(t)} + V_{(t)}) \quad (Gl. 2.5.3)$$

mit

$bofeu_{(t)}$:	Relative Bodenfeuchte im Zeitschritt t	[mm]
$N_{eff(t)}$:	Effektiver Niederschlag im Zeitschritt t	[mm]
$q_{Tfl(t)}$:	Teilflächenabfluss im Zeitschritt t, umgerechnet in	[mm]
$q_{bofeu(t)}$:	Aufsättigung der Bodenfeuchte aus Niederschlag im Zeitschritt t	[mm]
$V_{(t)}$:	Aktuelle Evapotranspiration je Zeitschritt	[mm]

Ist die relative Bodenfeuchte < 0 , wird ein Anteil des Niederschlags zur Aufsättigung der Bodenfeuchte verwendet und fließt nicht ab. Der Anteil wird aus den Niederschlagskomponenten für Interflow $N_{eff,i}$ und Grundwasserabfluss $N_{eff,u}$ berechnet. Es werden maximal 90 % des Niederschlages zur Aufsättigung des Bodens verwendet, d. h. es bleiben auch bei sehr trockenen Böden mindestens 10 % des Niederschlages abflusswirksam. Als Rechenanweisung gilt:

wenn $\text{bofeu}_{(t)} < 0$ und $\text{bofeu}_{(t)} \geq -90$

$$q_{\text{bofeu}(t)} = (-\text{bofeu}_{(t)} / 100) \cdot (N_{\text{eff},i(t)} + N_{\text{eff},u(t)}) \quad [\text{mm}]$$

wenn $\text{bofeu}_{(t)} < -90$

$$q_{\text{bofeu}(t)} = -0.9 \cdot (N_{\text{eff},i(t)} + N_{\text{eff},u(t)}) \quad [\text{mm}]$$

mit

$N_{\text{eff},i(t)}$: Effektiver Niederschlag für den Interflow [mm]

$N_{\text{eff},u(t)}$: Effektiver Niederschlag für den Grundwasserabfluss [mm]

Der bodenfeuchteabhängige Speicherinhalt $S_{\text{cn,bf}}$ des Bodenspeichers ist

$$S_{\text{cn,bf}} = \frac{25400}{\text{CN}_{\text{bf}}} - 254 \quad (\text{Gl. 2.5.4})$$

mit

$S_{\text{cn,bf}}$: Bodenfeuchteabhängiger Speicherinhalt [mm]

Das SCS-Verfahren enthält keinen Term, der die Abtrocknung des Bodens in Regenspauzen beschreibt. Daher wird für Langfristsimulationen ein Verlustterm ΣL eingeführt, der den nicht mehr im Boden vorliegenden gefallenen Niederschlag darstellt. Der Term „Restniederschlagssumme“ ΣNL als Differenz aus ΣN und ΣL ersetzt in Gl. 2.5.1 den aufsummierten Niederschlag ΣN . Der Verlustterm ΣL nähert sich nach jedem Zeitschritt um einen empirisch ermittelten Faktor f dem aufsummierten Niederschlag ΣN .

$$\Sigma L_{(t)} = \Sigma L_{(t-1)} + (\Sigma N_{(t-1)} - \Sigma L_{(t-1)}) \cdot f \quad (\text{Gl. 2.5.5})$$

$$\Sigma NL_{(t)} = \Sigma N_{(t)} - \Sigma L_{(t)} \quad (\text{Gl. 2.5.6})$$

mit

$\Sigma L_{(t)}$: Aufsummierte Verluste bis zum Zeitintervall t [mm]

f : Empirisch ermittelter Annäherungsfaktor $f = 0.1$ [-]

$\Sigma NL_{(t)}$: Restniederschlagssumme im Zeitintervall t [mm]

Bei der Simulation der Evapotranspiration wird davon ausgegangen, dass zunächst das Niederschlagswasser auf Blättern und in Mulden verdunstet,

bevor die Verdunstung auf den Bodenfeuchtespeicher $bofeu$ zugreift. Der Anfangsverlust I_a in Gl. 2.5.1 wird bei Berücksichtigung der Evapotranspiration zu einem dynamischen Verlustspeicher $S_{L(t)}$, welcher durch Niederschlag $N_{(t)}$ gefüllt und durch aktuelle Evapotranspiration $V_{(t)}$ geleert wird. Solange der Verlustspeicher $S_{L(t)}$ nicht die maximale Füllung S_{Lmax} erreicht hat, wird der aktuelle Niederschlag $N_{(t)}$ vollständig dem Verlustspeicher $S_{L(t)}$ zugeschlagen und kein Niederschlag wird abflusswirksam.

Wenn $S_{L(t)} < S_{Lmax}$

$$S_{L(t)} = S_{L(t-1)} + N_{(t)} - V_{(t)} \quad (\text{Gl. 2.5.7})$$

und

$$N_{eff(t)} = 0$$

mit

$S_{L(t)}$: Verlustspeicherinhalt zum Zeitpunkt t [mm]

S_{Lmax} : Maximaler Inhalt des Verlustspeichers [mm]

S_{Lmax} wird als Modellparameter eingelesen. Für S_{Lmax} wird ein Standardwert von 5 mm vorgegeben, er kann nach Maniak (1997) theoretisch bis zu 40 mm betragen. Ist $S_{L(t)}$ gleich S_{Lmax} , wird der aktuelle Niederschlag nicht durch Interception abgemindert. Ist $S_{L(t)}$ durch Evapotranspiration zu 0 reduziert, wird die Bodenfeuchte $bofeu_{(t)}$ um die aktuelle Evapotranspiration reduziert.

Wenn $S_{L(t)} = 0$

$$bofeu_{(t)} = bofeu_{(t-1)} - V_{(t)} \quad (2.5.8)$$

Für jede Nutzgruppe einer Teilfläche wird der bodenfeuchteabhängige CN_{bf} -Wert nach Gl. 2.5.2 und der effektive Niederschlag getrennt ermittelt. Nach Gl. 2.5.9 wird der in das Grundwasser versickernde Niederschlagsanteil $N_{eff,u(t)}$ berechnet. Der verbleibende Direktabflussanteil $1 - N_{eff,u(t)}$ wird durch den dimensionslosen Modellparameter $anto$ auf Oberflächenabfluss $N_{eff,o(t)}$ und Interflow $N_{eff,i(t)}$ aufgeteilt.

$$N_{eff,u(t)} = \frac{S_{cn,bf}^2}{[\sum NL_{(t)} - I_{a(t)} + S_{cn,bf}]^2} \cdot N_{(t)} \quad (\text{Gl. 2.5.9})$$

$$N_{\text{eff},o(t)} = [N_{(t)} - N_{\text{eff},u(t)}] \cdot \text{anto} \quad (\text{Gl. 2.5.10})$$

$$N_{\text{eff},i(t)} = [N_{(t)} - N_{\text{eff},u(t)}] \cdot [1,0 - \text{anto}] \quad (\text{Gl. 2.5.11})$$

mit

$N_{\text{eff},o(t)}$: Effektiver Niederschlag für den Oberflächenabfluss [mm]

anto: Modellparameter für die Aufteilung des Direktabflusses [-]

Der Parameter anto wird durch Kalibrierung ermittelt. Die Niederschlagsanteile für die Abflusskomponenten einer Teilfläche j ergeben sich aus der Summe der Niederschlagsanteile aller Nutzgruppen z.

$$N_{\text{eff},j(t)} = \sum_{z=1}^{j=n_z} (N_{\text{eff},o(t,z)} + N_{\text{eff},i(t,z)} + N_{\text{eff},u(t,z)}) \quad (\text{Gl. 2.5.12})$$

mit

n_z : Anzahl der Nutzgruppen in einer Teilfläche [-]

$\left. \begin{array}{l} N_{\text{eff},o(t,z)}, \\ N_{\text{eff},i(t,z)}, \\ N_{\text{eff},u(t,z)} \end{array} \right\}$ Abflusswirksamer Niederschlagsanteil für Oberflächenabfluss (o), Interflow (i) und Grundwasserabfluss (u) im Zeitschritt t bei der Nutzgruppe z [mm]

2.5.2 Abflusskonzentration

In NAXOS wird die Abflusskonzentration in zwei Teilprozessen simuliert. Nach Aufteilung des abflusswirksamen Niederschlags bei der Abflussbildung auf die drei Bodenspeicher (Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss) erfolgt die Transformation zu Abflussganglinien durch Einzellinearspeicher für jeden der drei Bodenspeicher. Die Speicherkonstanten der drei Bodenspeicher werden anhand des mittleren Flächengefälles, der mittleren Hanglänge l_m , der Gewässerdichte GewD sowie den Kalibrierungsparametern für Oberflächenabfluss (fspk_o), Interflow (fspk_i) und Grundwasserabfluss (fspk_u) ermittelt. Die mittlere Hanglänge wird aus der Gewässerdichte (Summe aller Gewässerslängen dividiert durch Flächengröße) abgeleitet (vgl. auch Kap. 3.1.2).

Anhand der Länge des Hauptgerinnes, der Gewässerdichte und der Flächengröße wird programmintern mittels eines Regelwerks auf Anzahl und Anordnung von Nebengewässern geschlossen. Mit den berechneten Fließzeiten in dem Haupt- und in den Nebengerinnen sowie der Fließzeit in der Landphase wird für jede Teilfläche ein Fließzeit-Flächen-Diagramm für die Abflusskonzentration erstellt. Der Abfluss aus den drei Bodenspeichern wird dabei nicht auf einen einzelnen Knoten im Gewässernetz, sondern transformiert durch das Fließzeit-Flächen-Diagramm - also zeitlich verteilt - auf das Hauptgerinne übertragen. Diese Funktion ist in Kap. 3.1.2 näher erläutert.

Die Speicherkonstante für den Oberflächenabfluss k_o ergibt sich aus der Multiplikation eines Kalibrierungsfaktors f_{spk_o} mit der Fließzeit t_y zu

$$k_o = f_{spk_o} \cdot t_y \quad (\text{Gl. 2.5.13})$$

mit

$$t_y: \quad \text{Mittlere Fließzeit auf einem Hang, } t_y = \frac{l_m}{v_y \cdot 3600} \quad [\text{h}]$$

$$l_m: \quad \text{Mittlere Hanglänge, } l_m = 0,5 \cdot b_{Tfl} \quad [\text{m}]$$

$$v_y: \quad \text{Mittlere Fließgeschwindigkeit auf dem Hang, } v_y = 0,2 \cdot l_y^{0,35} \quad [\text{m/s}]$$

$$l_y: \quad \text{Mittleres Hanggefälle} \quad [\text{‰}]$$

Für die Berechnung der Speicherkonstanten für Interflow k_i und Grundwasserabfluss k_u wird mit den Modellparametern f_{spk_i} und f_{spk_u} entsprechend verfahren. Die Kalibrierungsfaktoren f_{spk_o} , f_{spk_i} und f_{spk_u} erfassen pauschal den Einfluss schwer zu erhebender Größen wie der lokalen Untergrundbeschaffenheit oder anthropogener Einflüsse (z. B. Dränung) auf die Abflusskonzentration.

2.5.3 Basis- oder Anfangsabfluss

Für die Simulation der Hochwasserereignisse mit einer Dauer von wenigen Tagen oder Wochen hat sich in Modellen die Annahme einer konstanten oder exponentiell fallenden Basisabflussspende bewährt, die vom Hochwasserabfluss unabhängig berechnet wird. In NAXOS können sowohl konstante als auch exponentiell fallende Basisabflussspenden vorgegeben werden.

Konstanter Basisabfluss

$$Q_{\text{bas}} = A_{\text{Eo}} q_{\text{bas}}$$

Exponentiell fallender Basisabfluss

$$Q_{\text{bas}(t)} = A_{\text{Eo}} \cdot q_{\text{bas}} \cdot e^{-t/k_{\text{bas}}} \quad (\text{Gl. 2.5.14})$$

mit

Q_{bas} : Konstanter Basisabfluss [m³/s]

$Q_{\text{bas}(t)}$: Exponentiell fallender Basisabfluss im Zeitschritt t [m³/s]

A_{Eo} : Flächengröße des Einzugsgebietes [km²]

q_{bas} : Basisabflussspende [l/s km²]

k_{bas} : Rückgangskonstante des Basisabflusses [h]

Für Kontinuumssimulationen ist in NAXOS zusätzlich das Basisabflussmodul „Speichervorfüllung“ enthalten, mit dem für die drei Einzellinearspeicher des Abflusskonzentrationsmoduls separate Anfangsabflussspenden vorgegeben werden. Der Basisabfluss ist bei $t = 0$

$$Q_{(t=0)} = A (q_{\text{Obas}} + q_{\text{Ibas}} + q_{\text{Ubas}}) \quad (\text{Gl. 2.5.15})$$

Für den Speicher für Oberflächenabfluss gilt

$$Q_{\text{O}(t)} = A_{\text{Eo}} \cdot q_{\text{Obas}} \cdot e^{-t/k_{\text{Obas}}} \quad (\text{Gl. 2.5.16})$$

mit

$Q_{\text{O}(t)}$: Basisabfluss des Oberflächenabflussspeichers [m³/s]

$\left. \begin{matrix} q_{\text{Obas}} \\ q_{\text{Ibas}} \\ q_{\text{Ubas}} \end{matrix} \right\}$
 Basisabflussspenden der Speicher für Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasser [l/s km²]

$\left. \begin{matrix} k_{\text{Obas}} \\ k_{\text{Ibas}} \\ k_{\text{Ubas}} \end{matrix} \right\}$
 Rückgangskonstanten des Basisabflusses für Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasser [h]

Sinngemäß werden die Basisabflüsse für den Interflow und den Grundwasserabfluss ermittelt.

2.5.4 Wellenablauf ohne Rückstau im Zeitschrittmodell

2.5.4.1 Verformung der Abflussganglinie im Gerinne

Bei der Berechnung der Wellenverformung im Gerinne werden die Teilprozesse Translation und Retention getrennt parametrisiert und simuliert. Die Fließgeschwindigkeit v_x der Translation wird anhand der Gleichung nach Rother (1974) berechnet:

$$v_x = v_{x0} \left(\frac{k_{St}}{30} \right)^{0,73} I_x^{0,35} \quad (\text{Gl. 2.5.17})$$

mit:

v_{x0}	Bezugsgröße der Fließgeschwindigkeit	[m/s]
	$v_{x0} = 0,12 + 0,086 \ln(A_{E0})$	für $A_{E0} \geq 1,0 \text{ km}^2$
	$v_{x0} = 0,12$	für $A_{E0} < 1,0 \text{ km}^2$
k_{St}	Rauheit nach Manning-Strickler	[m ^{1/3} /s]
I_x	Sohlgefälle des Gerinnes	[‰]

Die Retention wird durch Einzellinearspeicher simuliert. Die Speicherkonstante ist

$$k_G = t_x \cdot f_{spk_G} \quad (\text{Gl. 2.5.18})$$

mit

k_G	Speicherkonstante für Gerinneretention	[h]
t_x	Fließzeit im Hauptgerinne	[h]
f_{spk_G}	Kalibrierungsfaktor für Gerinneretention	[-]

Durch die Konzeption als Zeitschrittmodell ist für die Berechnung des nicht rückstaubeeinflussten Gerinneabflusses ein Gerinnenmodell erforderlich, um die Abflüsse zeitlich unterschiedlich langer Fließabschnitte lagegenau zu berechnen. Fließabschnitte kleiner oder gleich der Rechenzeitschrittweite Δt werden als *Gerinneselement* bezeichnet. Weist eine Teilfläche eine Fließzeit

$t_x > \Delta t$ auf, enthält sie mehrere Gerinnesegmente. Teilflächen mit $t_x < \Delta t$ weisen nur ein verkürztes Gerinnesegment auf.

Bei Verwendung von Gerinnesegmenten kann eine räumliche Differenzierung des Abflusses innerhalb des Hauptgerinnes einer Teilfläche vorgenommen werden. Wenn die Fließzeit des Hauptgerinnes t_x kürzer als die Rechenschrittweite Δt ist, wird zur genaueren Nachbildung der Fließwege und -zeiten am Ende eines Rechenschrittes ein Anteil des Landflächenabflusses bereits der Folgefläche zugeordnet. Die Abflüsse werden für die Transformation des Landflächenabflusses zum Gerinneabfluss in Volumina umgerechnet. Das Volumen des Landflächenabflusses innerhalb eines Zeitschritts Δt

$$V_{\text{Land}} = Q_{\text{Land}} \cdot \Delta t \quad (\text{Gl. 2.5.19})$$

wird anteilig auf das Gerinne der Teilfläche und auf dessen Folgefläche übertragen:

$$VZ_{\text{Ger}} = (t_x / \Delta t) \cdot V_{\text{Land}} \quad (\text{Gl. 2.5.20})$$

$$VZ_{\text{Ger}+1} = V_{\text{Land}} - VZ_{\text{Ger}} \quad (\text{Gl. 2.5.21})$$

mit

Q_{Land} :	Landflächenabfluss	[m³/s]
V_{Land} :	Volumen des Landflächenabflusses im Zeitschritt	[m³]
VZ_{Ger} :	Volumen des Gerinnezuflusses im Zeitschritt	[m³]
$VZ_{\text{Ger}+1}$:	Volumen des Gerinnezuflusses, das im Zeitschritt über das Teilflächengerinne hinaus in die Folgefläche entwässert	[m³]

Ist t_x größer als Δt , wird der Landflächenabfluss während eines Zeitschritts vollständig auf das Hauptgerinne der Teilfläche übertragen. Bei Teilflächen mit einer Fließzeit kleiner Δt werden alle Landflächenabflüsse lagegenau auf das Hauptgerinne übertragen. Da innerhalb einzelner Segmente die Zu- und Abflüsse gemittelt sind, richtet sich die Wahl der Rechenschrittweite nach der kürzesten Fließzeit der Teilflächen, für die eine nicht mit Nachbarsegmenten gemittelte Abflussganglinie gefordert ist. Für die Berechnung der Translation ist es nicht relevant, ob ein Fließabschnitt in einen oder mehrere Teilflächen untergliedert ist. Bei der Retention, die mit Einzellinearspeichern simuliert wird, führt die Untergliederung eines Fließabschnittes in mehrere Teilflächen

zu einer Erhöhung der Anzahl von Einzellinearspeichern. Bleibt die Summe der Speicherkonstanten bei der Untergliederung gleich, wird die Retention mit zunehmender Anzahl von Einzellinearspeichern bzw. Teilflächen verringert.

Um die Übertragung des Landflächenabflusses auf mehrere Folgeflächen zu vermeiden, wird empfohlen, die Rechenschrittweite hinreichend klein zu wählen, dass die aufsummierten Gerinnefließzeiten zweier aufeinander folgender Teilflächen die Zeitschrittweite Δt nicht überschreiten.

2.5.4.2 Verformung der Abflussganglinie durch Speicherbecken

Die Abflussganglinien aus Speicher- oder Rückhaltebecken können nach der Modified Puls Method simuliert werden. Für Details wird hierfür auf die Fachliteratur wie z. B. Maniak (1997) verwiesen. Für die Simulation von Speichern können zusätzlich folgende Abgaberegeln vorgegeben werden:

- konstanter Regelabfluss,
- Steuerung abhängig von Wasserständen an Steuerpegeln,
- Abgabe als eingelesene Ganglinie.

Für Details zu den Regelungsarten wird auf das NAXOS-Handbuch verwiesen.

2.5.5 Wellenablauf mit Rückstau

Die Simulation von Wasserstand und rückstaubeeinflusstem Abfluss mittels Kettenspeicher ist in Kap. 4.4 beschrieben.

2.6 Bilanzrechnungen

In NAXOS werden die Bilanzen des simulierten Niederschlag-Abfluss-Prozesses unter Berücksichtigung des Einflusses von Verdunstung, Schnee und eingelesenen Seitenwellen berechnet und in der Bilanzdatei (*.bil) ausgegeben. Mit Ausnahme der Abflussbeiwerte [-] sind alle Bilanzgrößen in [mm] umgerechnet. Die in Tab. 2.6.1 aufgeführten Größen werden für jede Teilfläche ausgegeben.

Als Besonderheit der Bilanz muss die unterschiedliche Verwendung des Basisabflusses nach Prozedur 30 oder 31 und der Speichervorfüllung nach

Prozedur 131 erläutert werden (vgl. Kap. 2.5.3). Der bei kürzeren Simulationsdauern häufig verwendete Basisabfluss wird in NAXOS rechentechnisch vom Abfluss aus Niederschlag getrennt, so dass eine vom Basisabfluss unabhängige Abflussbeiwertberechnung möglich ist. Bei der Berechnung mit Speichervorfüllung wird der Basisabfluss mit dem Abfluss aus Niederschlag gemeinsam als Teilflächenabfluss betrachtet.

Tab. 2.6.1 Ausgegebene Bilanzgrößen

N_{sum}	Gebietsniederschlag der Teilfläche
V_{sum}	Summe der eingelesenen Verdunstung
N_{eff}	Infiltrierter Niederschlag, der die Bodenspeicher o, i, u füllt $N_{\text{eff}} = N_{\text{sum}} - \text{AufS} - \text{Intcpt}$
Snow	Höhe der Schneedecke am Ende der Simulation, angegeben als Wasser-äquivalent
AufS	Summe des N-Verlustes durch Aufsättigung der Bodenfeuchte
Intcpt	Summe des N-Verlustes durch Interception
ETP	Summe des N-Verlustes durch Evapotranspiration
$Q_{(A_0)}$	Gesamtabflusshöhe am Auslass der Teilfläche (mit Abfluss der Oberlieger und der Speichervorfüllung)
$Q_{(\text{TFL})}$	Gesamte Abflusshöhe des Landflächenabflusses der Teilfläche
(o)	Landflächenabfluss der Teilfläche, nur aus Oberflächenspeicher
(i)	Landflächenabfluss der Teilfläche, nur aus Interflowspeicher
(u)	Landflächenabfluss der Teilfläche, nur aus Grundwasserspeicher
psi_{TFL}	Abflussbeiwert der Teilfläche (Landflächenabfluss gegen Gebietsniederschlag, nicht Gerinneabfluss)
psi_{Ges}	Abflussbeiwert des oberhalb der Teilfläche liegenden Einzugsgebiets * bedeutet, dass eine Seitenwelle im Gebiet oberhalb eingelesen wurde
A_{E_0}	Flächengröße des Einzugsgebietes bis zum Gebietsauslass [km ²]
N_G	Gebiets-Niederschlag
Q_G	Gesamt-Gebietsabfluss (ohne Basisabfluss)
Q_{BG}	Gesamt-Basisabfluss
psi	Gesamt-Abflussbeiwert

Weitere Kontrollen und Bilanzen werden speziell für Speicher ausgegeben, welche z. B. als Hochwasserrückhaltebecken, als Vorlandspeicher und bei

den Kettenspeichern zum Einsatz kommen. Da bei der Simulation mit Kettenspeichern die Erstellung der Speicherinhaltslinie wahlweise aus einem digitalen Höhenmodell oder vorgegebenen Grabenklassen abgeleitet werden kann, werden alle derart automatisch generierten Speicherinhaltslinien in der Kennliniendatei (*.ken) zur Kontrollmöglichkeit aufgeführt. In der Speicherausgabedatei (*.wqs) werden Zufluss, Wasserstand und Abfluss aus jedem Speicher für jeden Rechenzeitschritt aufgelistet. In der Speicherbilanzdatei (*.sbl) werden für die Simulationsdauer summarisch Zuflüsse und Abflüsse (minimale, mittlere und maximale) sowie Wasserstände und Speicherfüllungen aufgeführt.

3 Der Modellparameter Gewässerdichte

Dem Modellparameter Gewässerdichte kommt in den Modellansätzen zur Simulation der Abflusskonzentration und bei der Berechnung des Grabenstauraums eine wesentliche Bedeutung zu, weil mit diesem Parameter der maßstabsbedingte Skaleneinfluss auf Simulationsergebnisse reduziert werden kann. Das Gewässernetz wird in NAXOS in drei verschiedene Kategorien untergliedert. Die erste Kategorie entspricht dem Hauptgerinne, die zweite einem Nebengerinne 1. Ordnung und die dritte Kategorie einem Nebengerinne 2. Ordnung. Wenn keine Angaben über Nebengewässer vorliegen, können diese anhand der Gewässerdichte und anhand von empirischen Regelsystemen abgeleitet werden.

3.1 Skaleneinfluss bei Simulation der Abflusskonzentration

Das Modell NAXOS basiert auf dem Niederschlag-Abfluss-Modell NASMO (Stödter, 1994) und wurde mit der Vorgabe weiterentwickelt, die skalenabhängigen Prozesse zur Beschreibung der hydrologischen Teilprozesse Abflussbildung, -konzentration und Retention zu verbessern (Maniak, 1998; Riedel, Maniak, 1999). Zwar hat sich das Modell NASMO bei zahlreichen Flussgebietsmodellen bewährt, jedoch musste die Parametrisierung dieser Teilprozesse durch Kalibrierung von ca. 10 Modellparametern je Teilgebiet durchgeführt werden. Für die Abflusskonzentration werden bei NASMO drei Modellparameter verwendet. Eine Übertragbarkeit dieser drei Modellparameter auf vergleichbare Untersuchungsgebiete ist prinzipiell möglich, jedoch sind diese Modellparameter an die Raum- und Zeitskala des Ausgangsgebiets gebunden.

In den einzelnen Raumskalen dominieren unterschiedliche Prozesse, was die Modellierung erschwert. Beim Übergang von einer zur nächstgrößeren Skala ist eine Modellreduktion und eine Parameteraggregation erforderlich. Für eine der gewählten Aufgabe und Skala angemessene Datengewinnung, Prozeßbeschreibung und Modellstruktur werden zunehmend Angaben zu Fließwegen, Herkunftsräumen und Verweilzeiten von Wasser- und Stoffflüssen benötigt. Die meisten N-A-Modelle sind jedoch monoskalig. Es fehlen

die großskaligen N-A-Modelle, die mit großskaligen meteorologischen Modellen und Klimamodellen gekoppelt werden können. In derartige Modelle müssen für die Skalen geeignete Wellenablaufkomponenten integriert werden (BMU, 1997).

Zur Berechnung der Konzentrationszeiten besteht eine Reihe von meist empirischen Ansätzen (z. B. Kirpich, 1940; Kerby, 1959). Diese Ansätze berücksichtigen topografische Parameter wie mittleres Gefälle und Länge des Vorfluters, Einzugsgebietsgröße und Landnutzung. Die Werte der Parameter sind von der räumlichen Auflösung der Eingangsdaten und der Untergliederung eines Gebietes in Teilgebiete abhängig. Sie sind daher nicht ohne weiteres auf andere Raumskalen bzw. Gebiete übertragbar.

Bei der Simulation der Abflusskonzentration sind lineare Speicher verbreitet. Der Gebietsabfluss wird dabei in mehrere nach Herkunftsräumen untergliederte Abflusskomponenten unterschieden (z. B. Modell DIFGA, Dyck & Peschke, 1995, S. 212). Die Speicherkonstanten der Linearspeicher werden i. d. R. durch Kalibrierung an abgelaufenen Hochwassern ermittelt. Im Modell NASMO (Stödter, 1994) werden drei Einzellinearspeicher für Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss verwendet. In NASMO werden die Speicherkonstanten der Linearspeicher durch Multiplikation der Konzentrationszeit t_c eines Teileinzugsgebiets mit gebietsspezifischen Faktoren für Oberflächenabfluss (f_{spk_o}), Interflow (f_{spk_i}) und Grundwasserabfluss (f_{spk_u}) bestimmt, wobei die drei Faktoren als Modellparameter zu kalibrieren sind. Durch den Einfluss der Flächengröße auf die Konzentrationszeit ist die Regionalisierung und Übertragbarkeit der drei gebietsspezifischen Faktoren auf andere Gebiete nur dann gegeben, wenn die Teilflächen vergleichbare Flächengrößen, Fließlängen und Bodeneigenschaften aufweisen und in der gleichen Raumskala vorliegen.

Die Konzentrationszeit t_c eines Einzugsgebiets und die daraus abgeleiteten Speicherkonstanten für z. B. drei Speicher k_o , k_i und k_u hängen wesentlich von den Fließstrecken und -zeiten auf der Landphase und im Gerinne ab. Die mittlere Teilflächenbreite b_{Tfl} wird z. B. in NASMO durch die Division von Flächengröße durch die Länge des Hauptvorfluters berechnet. Die Fließstrecke auf der Landphase oder mittlere Hanglänge l_m entspricht - der Hauptvorfluter wird als mittig in der Teilfläche liegend angenommen - der halben Teilflächenbreite. Die Speicherkonstante für den Oberflächenabfluss k_o berechnet sich in erster Näherung aus der Konzentrationszeit t_c , die die

Summe der Fließzeit in der Landphase t_y und der Fließzeit im Gerinne t_x darstellt

$$t_y = \frac{l_m}{v_y \cdot 3600} \quad (\text{Gl. 3.1.1})$$

$$t_x = \frac{l_G}{v_x \cdot 3600} \quad (\text{Gl. 3.1.2})$$

$$k_o = t_c = t_y + t_x. \quad (\text{Gl. 3.1.3})$$

mit

t_c : Konzentrationszeit einer Teilfläche [h]

Die Fließlänge der Gerinne hängt von der räumlichen Auflösung und damit vom verwendeten Kartenmaßstab ab. Erfolgt die Unterteilung eines Einzugsgebietes in Teilflächen durch einmündende Gerinne, wird bei den üblichen Modellansätzen nur ein Gerinne je Modellteilfläche berücksichtigt. Hierdurch entsteht ein deutlicher Skaleneinfluss, wenn Parameter nichtlinearer Gleichungen von der Länge und Breite der Teilflächen abhängig sind. Für die mesoskalige hydrologische Modellierung ist ein Kartenmaßstab von 1:5 000 ausreichend genau, da hier Gewässer und Gräben kartografisch durch Generalisierung nicht entfernt sind.

Aus der durchschnittlichen Gerinnelänge pro km^2 Einzugsgebietsfläche, die als Gewässerdichte oder Gerinnenetzdicke bezeichnet wird, kann bei regelmäßiger Anordnung der Gerinne im Gebiet ein Faustwert für die mittlere Hanglänge abgeleitet werden. Mit zunehmender Gewässerdichte sind neben einem höheren Anteil von Flächen mit 100 % Abflussbeiwert auch durch kürzere Fließstrecken in der Landphase geringere Anlaufzeiten und höhere Spitzenabflüsse zu erwarten (Kölla, 1986). Abb. 3.1.1 zeigt den Trend zu höheren Spitzenabflüssen bei steigender Gewässerdichte. Die Gewässerdichte ist neben der Struktur von Flussnetzen, Flusslängen, Einzugsgebiet und dem Abflussregime abhängig von den Klima, Geländehöhe, Relief, Vegetation, Boden und der Geologie des Untergrundes. Die Abhängigkeit der Gewässerdichte von den geografischen Kennwerten und die Abhängigkeit

der Gewässerlängen vom Kartenmaßstab sind allerdings nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Anhand von Abflussmessserien an 170 Schweizer Einzugsgebieten hat Kölla (1987) zur Berechnung des x-jährlichen Scheitelabflusses eine Abwandlung der „rational formula“ (z. B. Chow, 1964)

$$Q_x = r_{x,TRx} \Psi_S A_{E0} \quad (\text{Gl. 3.1.4})$$

mit

Q_x :	x-jährlicher Scheitelabfluss	[m ³ /s]
$r_{x,TRx}$:	Bemessungsregen bei kritischer Regendauer TR_x	[mm]
Ψ_S :	mittlerer Abflussbeiwert	[-]
A_{E0} :	Einzugsgebietsgröße	[km ²]

vorgenommen. Danach ist nicht ein mittlerer Abflussbeiwert Ψ_S für die gesamte Fläche A , sondern die innerhalb der kritischen Regendauer TR_x zum Abfluss beitragende Fläche A_{effx} maßgebend für die Höhe des Scheitelabflusses:

$$Q_x = r_{x,TRx} A_{effx} \quad (\text{Gl. 3.1.5})$$

mit

A_{effx} :	Zum Abfluss beitragende Fläche	[km ²]
--------------	--------------------------------	--------------------

Kölla (1987) hat über die kumulativen Gerinne- und Hangfließzeiten die effektiv beitragende Fläche A_{effx} für Untersuchungsgebiete über Fließformeln kartografisch ermittelt und der aus topografischen Karten 1:25 000 entnommenen Gewässerdichte (kumulative Gerinnelänge) gegenübergestellt (Abb. A2 im Anhang). Der straffe Zusammenhang zwischen beiden Parametern zeigt für die Schweizer Einzugsgebiete eine hohe Bedeutung der Gewässerdichte für die Entwässerungsgeschwindigkeit und den Scheitelabfluss.

Mit Flussordnungen nach Strahler oder Horton kann man das Gewässernetz hierarchisch untergliedern. Die praktische Bedeutung des Konzeptes der Flussordnungen beruht auf der Hypothese, dass im Mittel bei genügend großem Flussgebiet die Ordnungszahl direkt proportional zur Größe eines

Einzugsgebiets, dem Flussquerschnitt und dem Durchfluss ist. Bei vielen Flussnetzen besteht eine Abhängigkeit zwischen der Ordnungszahl u eines Flussnetzes und der Anzahl von Flussabschnitten, den Flusslängen und den Gefällewerten der Flussabschnitte der Ordnungszahl $u+1$. Die Flusszahlen folgen der Gesetzmäßigkeit einer geometrischen Reihe, die als Gesetz der Flusslängen bezeichnet wird (Dyck & Peschke, 1995).

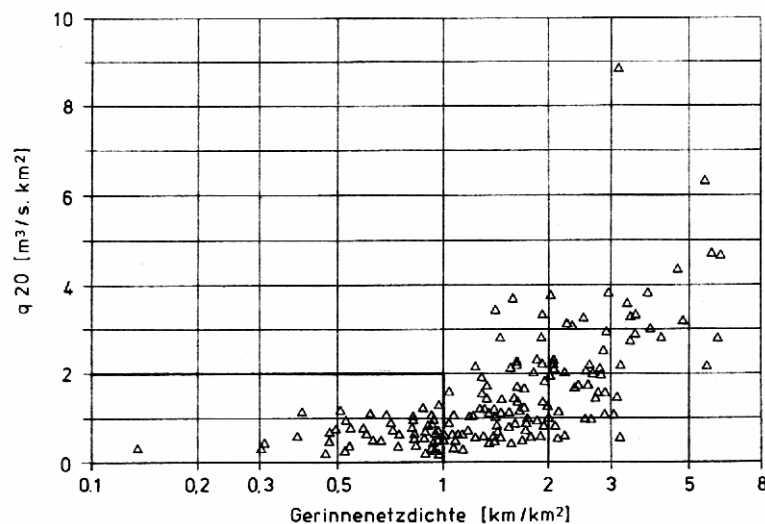


Abb. 3.1.1 Kumulative Gerinnenetzdichte und 20-jährliche Abflussspenden
(aus: Kölla, 1986)

Da bei Maßstäben kleiner ca. 1:50 000 durch Generalisierung zusätzlich zur Längensumme der Gewässer in zunehmendem Maße auch die Topologie des Gewässernetzes unberücksichtigt bleibt, sollte diese bei der Berechnung der Abflusskonzentration durch ein Regelsystem oder eine Gesetzmäßigkeit berücksichtigt werden. Untersuchungen der Gewässertopologie im Einzugsgebiet der Weser (Maniak, Riedel, 1998) haben gezeigt, dass bei Einzugsgebieten bis ca. 100 km² ein Regelsystem angewendet werden kann, das in Kap. 3.2 beschrieben ist.

Im tidebeeinflussten norddeutschen Flachland und anderen, künstlich entwässerten Gebieten wurde das bestehende Gewässernetz durch zahlreiche Gräben durch den Menschen umgestaltet. Dies führte zu kurzen Hanglängen - soweit man im Flachland von Hang sprechen kann - mit schneller Entwässerung in das Grabensystem. Da aufgrund des Rückstaus keine mittlere Fließgeschwindigkeit im Grabensystem abgeschätzt werden kann, wird die Berechnung der Abflusskonzentration in Teilprozesse in der Landphase und im Gerinne untergliedert.

Die kartografische Darstellung und die Detaillierung des Grabensystems variiert mit dem Maßstab, wie Abb. 3.1.2 am Beispiel der Lesum zeigt. Die Digitalisierung von Luftbildern im Maßstab 1:5 000 führt bei der Teilfläche 494.76 ($A = 12,31 \text{ km}^2$) zu einer aufsummierten Grabenlänge von 217 400 m ($17\,660 \text{ m/km}^2$), während bei der Digitalisierung nach der Hydrographischen Karte Niedersachsen im Maßstab 1:50 000 die Grabenlänge mit 142 250 m (entspricht $11\,560 \text{ m/km}^2$) etwa ein Drittel kürzer ist. Es sollte daher als Bezugsgröße die Gewässerdichte im Maßstab 1:5 000 herangezogen werden.

Tab. 3.1.1 Gewässerdichten innerhalb des Einzugsgebiets der Weser

HyKNds = Hydrographische Karte Niedersachsen 1:50 000

TOPAZ ist ein Programm von Garbrecht und Martz (1993)

Flussgebietsmodell (FGM) oder Teilfläche (TFL)	Gewässer	Mittlere Gewässerdichte [m/km ²]	Datenquelle
FGM Lesum (Verbandsgebiet)	Kleine Wümme, Gräben und Sieltiefs	8 965	TK 5, Luftbilder
FGM Käseburger Siel	Käseburger Sieltief	10 050	TK 5
TFL 494.76 (nach HyKNds.)	Kleine Wümme und Gräben	17 660 11 560	TK 5, Luftbilder HyKNds
FGM Weser	Alle Gewässer mit einem Einzugsgebiet $A_{E0} > 2,5 \text{ km}^2$	600	Berechnet mit TOPAZ (Garbrecht, Martz, 1993)

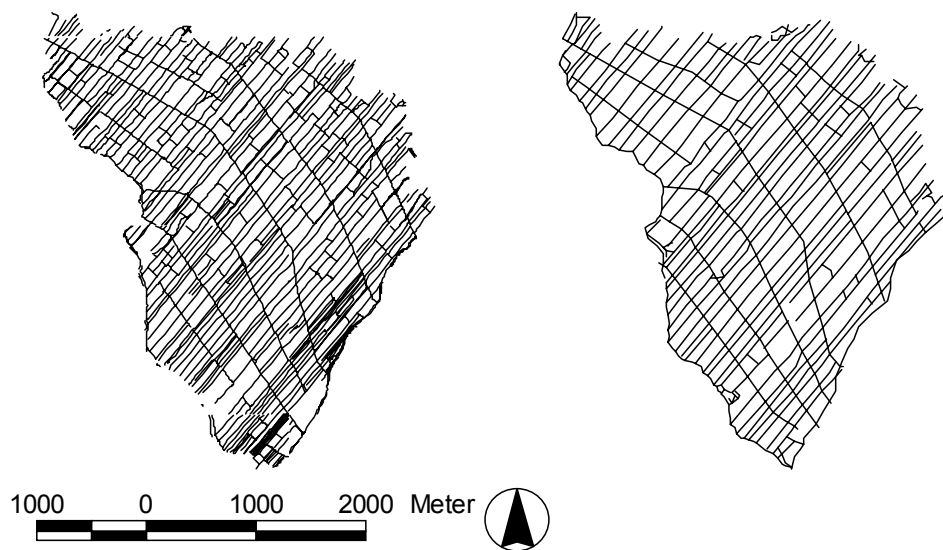


Abb. 3.1.2 Einzugsgebiet der Lesum, Gewässernetz der Fläche 494.76 bei Maßstab 1:5 000 (links) und 1:50 000 (rechts)

Bezeichnung nach Hydrographische Karte Niedersachsen (1983)

3.2 Abflusskonzentrationsansatz mit Berücksichtigung der Gewässerdichte

Im Modell NAXOS wird für die Abflusskonzentration neben Länge, Rauheit und Fließgefälle des Hauptvorfluters zusätzlich die Längensumme aller Gewässer in jeder Teilfläche berücksichtigt. Die Länge des Gewässernetzes als Summe der Länge von Haupt- und Nebengerinnen wird durch den Parameter Gewässerdichte ausgedrückt, der auch bei Skalenwechseln unverändert bleiben soll. Da nur die bei Maßstäben größer 1:5 000 ermittelte Gewässerdichte betrachtet werden soll, wird diese im Folgenden als Mindest-Gewässerdichte ($GewD_{min}$) bezeichnet.

Mit dem Parameter Mindest-Gewässerdichte wird durch Vorgabe eines Nebengewässer-Regelsystems das natürliche Gewässernetz abstrahiert im Modell abgebildet. Das Regelsystem wurde anhand einer Analyse der Gewässernetzstruktur im Wesereinzugsgebiet abgeleitet und berücksichtigt Hauptgerinne sowie Nebengerinne 1. (NG1) und 2. Ordnung (NG2). Die Länge der Nebengerinne wird anhand der Gewässerdichte und des Nebengerinne-Regelsystems bestimmt.

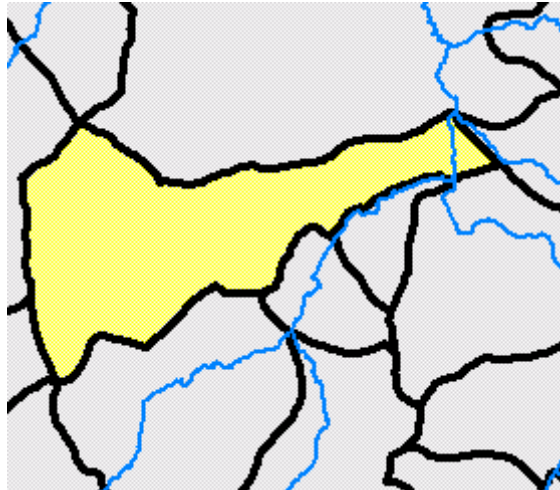


Abb. 3.2.1 Teilfläche mit sehr kurzem Hauptgerinne bezogen auf Flächen-
größe

(schwarz = Teilflächengrenzen, blau = Hauptgerinne)

Bei der Untergliederung von Teilflächen anhand des Gewässernetzes ergibt sich selbst innerhalb eines Kartenmaßstabes bei den Teilflächen ein Spektrum von kleinen bis großen Fließlängen und Flächengrößen (s. Abb. 3.2.2). Diese unterschiedlichen Teilflächengrößen lassen eine Ableitung der Nebengerinnelängen allein von der Hauptgerinnelänge, wie dies im Gesetz der Flusslängen vorgesehen ist, nicht zu. Abb. 3.2.1 zeigt in der markierten Teilfläche ein Beispiel für ein sehr kurzes Hauptgerinne, aus dessen Länge die Länge der Nebengewässer keinesfalls durch das Gesetz der Flusslängen abgeleitet werden kann.

Die Untergliederung des Gewässernetzes in Haupt- und Nebengerinne dient drei Teilprozessen innerhalb der Abflusskonzentration. Im ersten Teilprozess wird die mittlere Hanglänge l_m aus der Mindest-Gewässerdichte und der Teilflächengröße abgeleitet, so dass bei der Kalibrierung der Speicherkonstanten der Einfluss der Flächengröße entfällt. Die Speicherkonstanten für Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss ergeben sich aus der Multiplikation der Konzentrationszeit mit jeweils einem Faktor, der zu kalibrieren ist (vgl. Kap. 2.5.2). Die Konzentrationszeit beschreibt bei diesem Ansatz ausschließlich den Abfluss in der Landphase.

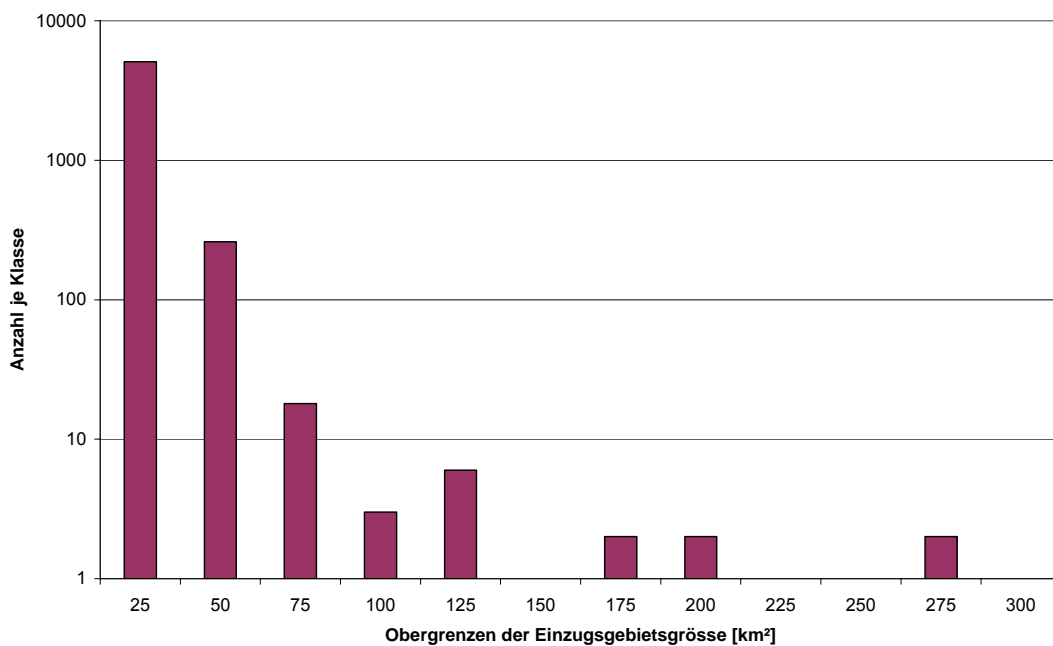


Abb. 3.2.2 Anzahl der nach der Hydrographischen Karte Niedersachsen klassifizierten Einzugsgebietsgrößen

Im zweiten Teilprozess wird anhand des programminternen Nebengewässer-Regelsystems ein Gewässernetz generiert und mittels berechneter Fließzeiten in den Haupt- und Nebengerinnen zur Generierung eines Fließzeit-Flächen-Diagramms benutzt (Abb. 3.2.3). Da die Fließzeiten in der Land- und Gerinnephase getrennt berechnet werden, erfolgt die Entwässerung des Landflächenabflusses in das Hauptgerinne im dritten Teilprozess. Hierbei wird der Landflächenabfluss dem Hauptgerinne nicht in einem einzigen Knoten, sondern in Abhängigkeit von der Flächenform verteilt über die Fließstrecke zugeführt. Teilflächen ohne virtuelle Nebengerinne können Rechteck- oder Rautenform annehmen. Liegen Nebengerinne vor, wird die Flächenform als „komplex“ bezeichnet und die Entwässerung wird von der Landfläche (Exfiltration und Oberflächenabfluss) durch das Fließzeit-Flächen-Diagramm (Abb. 3.2.3) zum Gerinneabfluss transformiert.

Für das Nebengewässer-Regelsystem wird die aktuelle Gewässerdichte $GewD_{akt}$ aus Hauptgerinnelänge und Flächengröße berechnet. Ist $GewD_{akt}$ größer als der Gebietskennwert Mindest-Gewässerdichte $GewD_{min}$, wird kein Nebengewässer angenommen und die mittlere Hanglänge wird berechnet als halbe mittlere Teilflächenbreite

$$l_m = 0,5 A_{Tfl} / l_H . \quad (Gl. 3.1.1)$$

Ist GewD_{akt} kleiner als GewD_{min} , werden Nebengerinne 1. und ggf. Nebengerinne 2. Ordnung eingeführt. Die mittlere Hanglänge l_m berechnet sich zu

$$l_G = A_{\text{Tfl}} \text{GewD}_{\text{min}} \quad (\text{Gl. 3.1.2})$$

und

$$l_m = 0,5 A_{\text{Tfl}} / l_G \quad (\text{Gl. 3.1.3})$$

mit

l_G : Längensumme aller Gerinne einer Teilfläche [m]

GewD_{min} : Mindest-Gewässerdichte [m/km²]

Nebengerinne 1. Ordnung (NG1) entwässern direkt in das Hauptgerinne, Nebengerinne 2. Ordnung (NG2) entwässern in Nebengerinne 1. Ordnung. Liegen mehrere Nebengerinne 1. Ordnung vor, münden sie äquidistant in das Hauptgerinne. Länge und Ordnung der Nebengerinne werden vom Nebengewässer-Regelsystem bestimmt und hängen von der Flächengröße, der Länge des Hauptgerinnes und der Flächenform ab. Da die eingeführten Nebengerinne nicht den natürlichen Verlauf des Gewässernetzes wiedergeben, werden sie als *virtuelle Nebengerinne* bezeichnet. Nebengerinne gleicher Ordnung besitzen jeweils identische Eigenschaften wie Fließlänge und -gefälle.

Die Randbedingungen für das Regelsystem werden als Modellparameter eingelesen und können ggf. für einzelne Flussgebiete gesondert erhoben werden. Für das Einzugsgebiet der Weser wurden bei Teilflächengrößen bis ca. 100 km² folgende Regelparameter abgeleitet und auf ganze Zahlenwerte gerundet:

- Unterhalb einer Flächengröße von 25 km² und unterhalb einer Längensumme der Nebengerinne von 25 000 m liegen nur Haupt- und ggf. mehrere Nebengerinne 1. Ordnung vor.
- Einzelne Nebengerinne NG1 sind nicht länger als 4 200 m. Ist die Längensumme größer, werden mehrere Nebengerinne NG1 generiert.
- Das Längenverhältnis aller Nebengerinne NG1 und NG2, die die Grenzlänge von 25 000 m überschreiten, beträgt 1 : 3. Die ersten 25 000 m jeder Teilfläche werden ausschließlich durch NG1 gebildet, das Verhältnis 1 : 3 gilt für alle weiteren Nebengerinne.

- Einzelne Nebengerinne NG2 sind nicht länger als 2 500 m. Ist die Längensumme aller NG2 größer, werden mehrere Nebengerinne NG2 generiert.

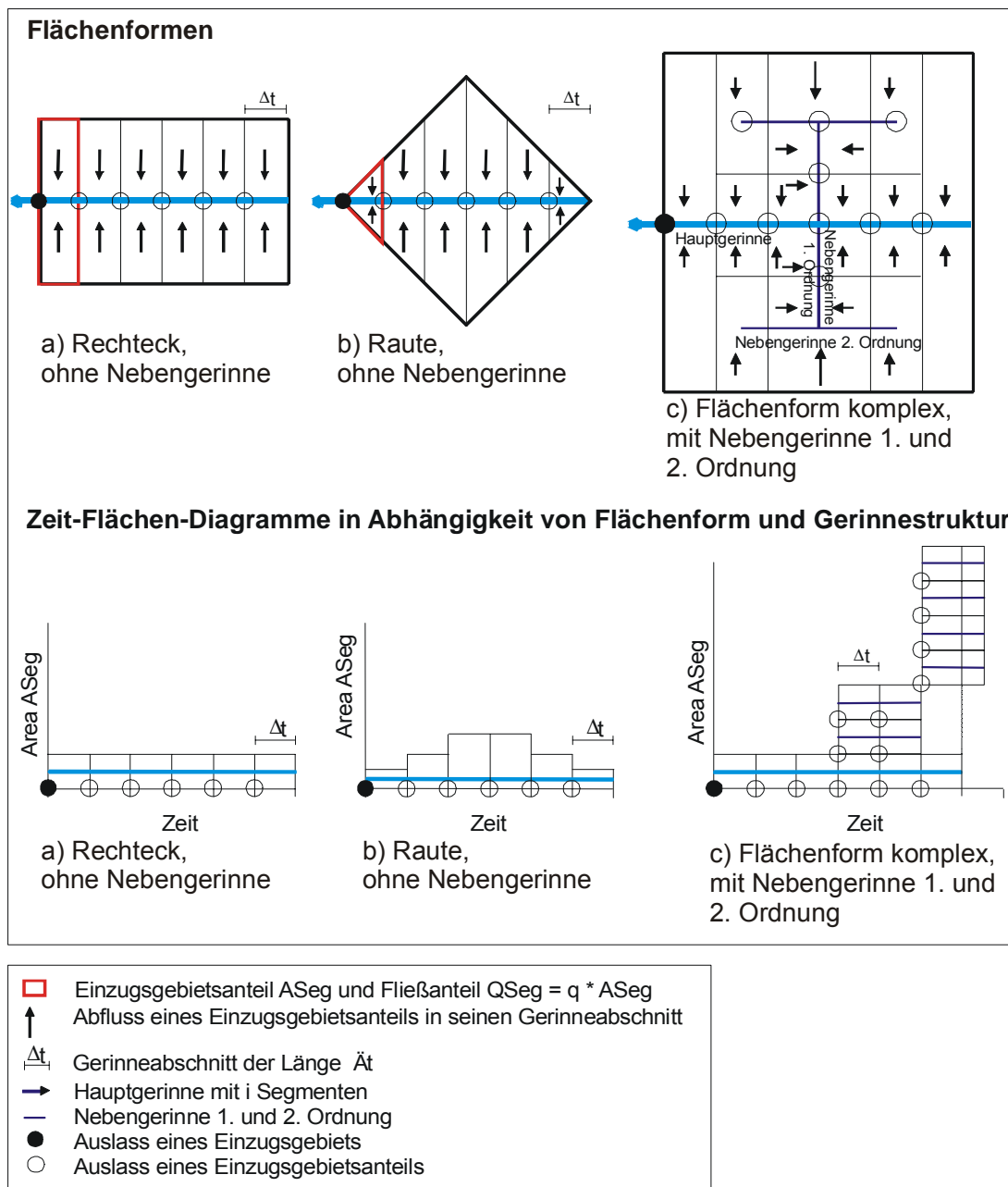


Abb. 3.2.3 Schema der Exfiltration ohne und mit Haupt- und Nebengerinne

Durch den Fortfall des Einflusses der Raumgröße lässt sich mit diesem Abflusskonzentrationsansatz ein breiteres Spektrum von kleinen bis großen Teilflächen ohne Änderung der Modellparameter simulieren. Abb. 3.2.4 zeigt

den Einfluss der Gewässerdichte auf die Abflussganglinie bei unterschiedlichen Aggregationsstufen in einem homogenen, synthetischen Untersuchungsgebiet. 64 Teilflächen in Rasterform mit je 1 km² Fläche und 1 000 m bzw. 1 414 m wurden schrittweise zu einer einzelnen Teilfläche zusammengefasst.

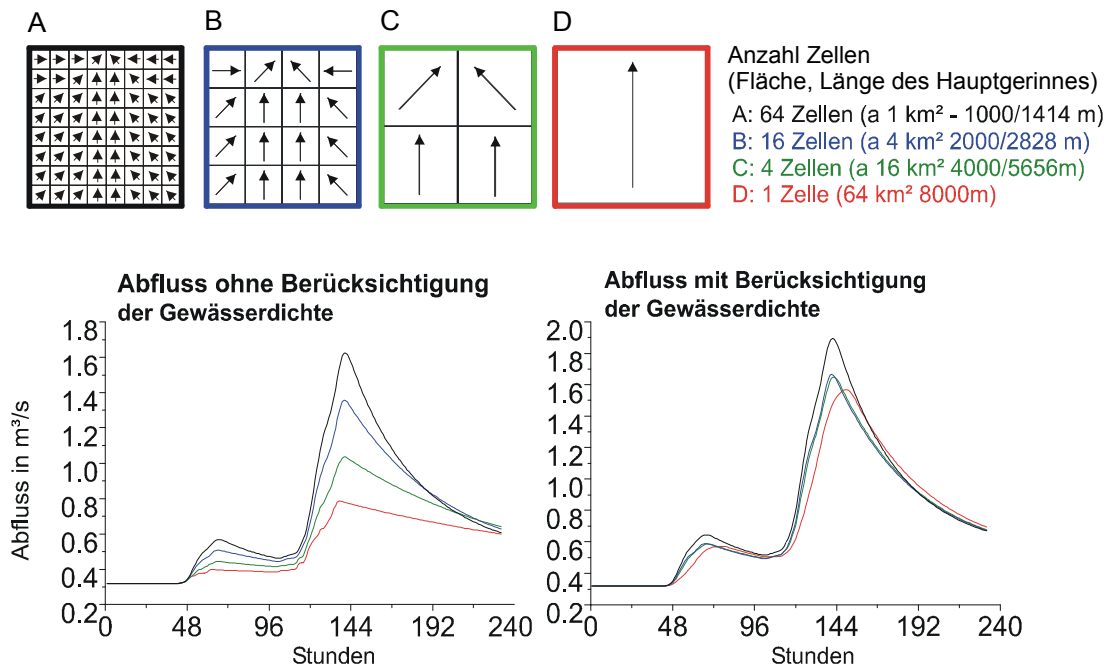


Abb. 3.2.4 Berechnete Abflussganglinien eines rasterbasierten Einzugsgebiets mit verschiedenen Aggregationsstufen

Ohne Berücksichtigung der Gewässerdichte schwankt der Scheitelabfluss um 100 % zwischen 0,8 und 1,6 m³/s, mit Gewässerdichte schwanken die Scheitelabflüsse lediglich um 22 % zwischen 1,55 m³/s und 1,9 m³/s. Die Abflussganglinien bei 16 und vier Teilflächen sind praktisch identisch.

Um die Obergrenzen der Aggregierbarkeit des Gewässernetzes zu ermitteln, wurde für NAXOS ein Aggregationsverfahren entwickelt. Dieses Verfahren rechnet die aus Karten erhobenen und kalibrierten Gebietskennwerte (Bodengruppe nach SCS, Speicherkonstanten, Fließlänge und Fließgefälle) für aggregierte Teilflächen zu effektiven Gebietskennwerten um, so dass die Landflächenabflüsse der aggregierten Teilflächen mit den nicht aggregierten übereinstimmen. Für den Wellenablauf im Gerinne wird aus den Gewässern der nicht aggregierten Teilflächen die längste Fließstrecke ermittelt und für diese Fließstrecke ein effektives Fließgefälle ermittelt, mit dem das Fließzeit-Flächen-Diagramm die größte Übereinstimmung mit den nicht aggregierten

Fließzeit-Flächen-Diagrammen aufweist (s. Abb. A3 im Anhang). Bei Mindestübereinstimmungen (max. Abweichung 5 % bzw. Korrelationskoeffizient $r > 0,95$) zwischen aggregierten und nicht aggregierten Parametern) wurden z. B. für das Einzugsgebiet des Pegels Duendorf ($A_{E0} = 198 \text{ km}^2$) in der Südaue/Aller 27 Teilflächen zu vier und zu einer einzelnen Teilfläche aggregiert. Δt

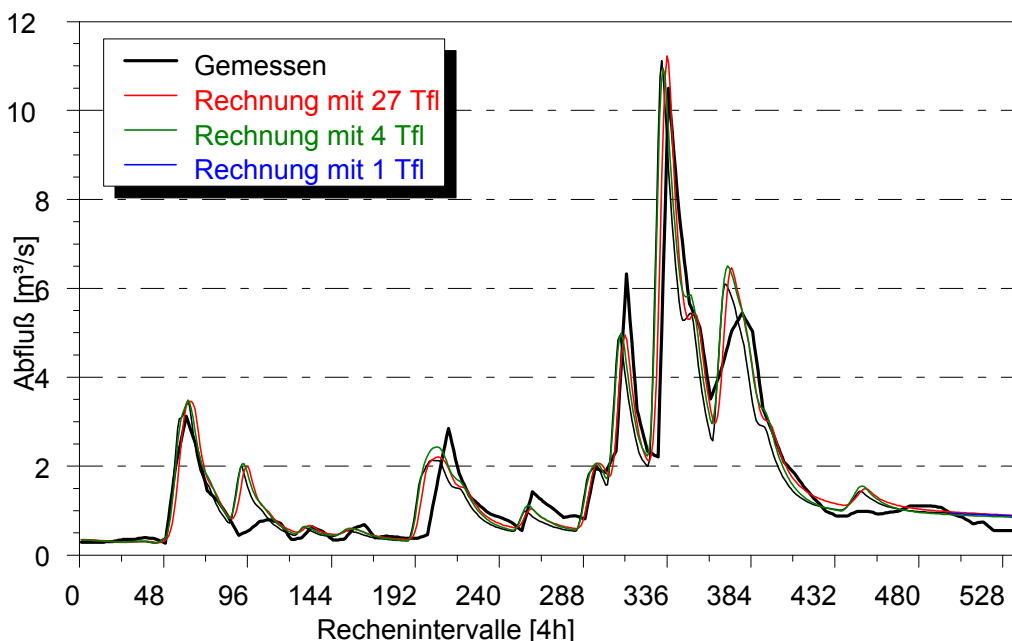


Abb. 3.2.5 Einfluss der Raumskala auf direkte Abflusskomponenten am Beispiel des Pegels Duendorf / Südaue (Allergebiet)

Die berechneten Ganglinien der drei Aggregationsstufen für ein Hochwasserereignis (Abb. 3.2.5) zeigen eine hohe Übereinstimmung der Abflussganglinien untereinander. Die maximalen Abweichungen beim Scheitelabfluss zwischen den drei Aggregationsvarianten betragen 1,5 %, die maximale Abweichung zwischen den simulierten Abflüssen beträgt etwa 10 % bei Intervall 200.

Aggregationen anderer Einzugsgebiete führten bei den Untersuchungen nicht immer zu vergleichbar guten Ergebnissen bei derart großen Einzugsgebieten. Es hat sich im Einzugsgebiet der Weser gezeigt, dass die berechneten Abflussganglinien am Gebietsauslass bei Gesamtgebietsgröße bis ca. 100 km^2 , wo die Abflussganglinie überwiegend von den Abflussprozessen in der Landphase geprägt ist, vom upscaling wenig beeinflusst sind.

Mit dem vorgestellten Abflusskonzentrationsansatz verbessert sich die Möglichkeit, effektive und skalenunabhängige Modellparameter aus topografischen Gebietskennwerten abzuleiten. Die Obergrenze der Aggregierbarkeit von ca. 100 km² ist dadurch gegeben, dass mit zunehmender Größe der Einzugsgebiete die Abflussganglinie stärker vom Wellenablauf im Gewässernetz beeinflusst wird und die Überlagerung der Wellen einzelner Gewässer zu einer Gesamtabflussganglinie nicht mehr zufrieden stellend durch ein einziges, repräsentatives Hauptgerinne nachgebildet werden kann.

3.3 Gewässerdichte und Grabenstauraum

Das Gewässersystem in tidebeeinflussten Einzugsgebieten ist i. d. R. durch ein dichtes Grabennetz mit Gewässerdichten bis über 10 000 m / km² gekennzeichnet (Tab. 3.1.1). Eine Simulation von mehreren hundert Gräben je Teilfläche ist innerhalb der hydrologischen Mesoskala nicht zweckmäßig. Bei den Gräben ist aufgrund des geringen Fließgefälles und zahlreichen Kreuzungen eine eindeutige Hauptfließrichtung häufig nicht erkennbar. Für die Simulation mit NAXOS wird das Grabensystem daher generalisiert.

Aus dem in Haupt- und Nebengerinne untergliederten Gewässernetz kann durch Zuordnung von Fließquerschnitten der verfügbare Grabenstauraum ermittelt werden. Die Speicherinhalte werden anhand der Gewässerdichte berechnet. Es wird angenommen, dass Hauptgerinne (1. Kategorie), Nebengerinne 1. Ordnung (2. Kategorie) und Nebengerinne 2. Ordnung (3. Kategorie) jeweils unterschiedliche Fließquerschnitte aufweisen. Wenn für jede Kategorie repräsentative Querprofile vorgegeben werden, kann das Gewässernetz durch drei einzelne Speicher abgebildet werden.

Der in Kap. 4.4 beschriebene Kettenspeicheransatz für die Simulation rückstaubeeinflusster Abflüsse berücksichtigt bis zu drei Speicher je Teilfläche und berechnet Wasserstände und Abflüsse für jeden Speicher bzw. für jede Grabenkategorie getrennt. Für die Zu- und Abflussberechnung zwischen diesen drei Speichern wird für die Ermittlung des Wasserspiegelgefälles der mittlere Abstand l_{Si} zwischen den Speichern benötigt.

Die Speicherinhaltslinien werden durch das Modell NAXOS unter Verwendung eines Gewässernetz-Shapefiles und eines rasterbasierten digitalen

Höhenmodells berechnet. Diese Berechnung erfolgt in mehreren Teilschritten.

Schritt 1: Berechnung der virtuellen Gräben

Das in Kap. 3.2 vorgestellte Nebengewässer-Regelsystem wird in abgewandelter Form für die Berechnung eines Grabenlängen-Regelsystem verwendet, das von einer symmetrischen Anordnung der Gräben in der Teilfläche ausgeht. Die aufsummierten Grabenlängen jeder Kategorie werden damit in eine Anzahl jeweils gleich langer Gräben umgerechnet. Diese berechneten Gräben sollen im Folgenden als *virtuelle Gräben* bezeichnet werden, da sie hinsichtlich Anzahl und Länge nur im Mittel mit den tatsächlichen Gräben übereinstimmen.

Es wird beim Grabenlängen-Regelsystem davon ausgegangen, dass alle Gräben symmetrisch angeordnet sind. Gräben gleicher Kategorien haben identische Eigenschaften. Gräben unterschiedlicher Kategorien münden jeweils im rechten Winkel zueinander ein (Abb. 3.3.1). Die Teilfläche wird zum Rechteck mit der mittleren Hauptgerinnelänge l_1 und der Breite b_1 abstrahiert. Für die Gräben der Kategorien 1, 2 und 3 werden die mittleren Fließlängen l_1 , l_2 und l_3 und die mittleren Hanglängen b_1 , b_2 und b_3 berechnet. Für die Gräben der Kategorien 2 und 3 muss zusätzlich die Anzahl der Gräben n_2 und n_3 ermittelt werden. Im Regelfall liegt nur ein Hauptgerinne je Teilfläche vor und die Längensumme aller Gräben der Kategorie 1 l_{G1} ist gleich der mittleren Länge l_1 . Bilden mehrere Gräben der ersten Kategorie das Hauptgerinne, muss eine repräsentative Fließlänge l_1 vorgegeben werden und l_{G1} weicht von l_1 ab. Liegen mehrere Hauptgerinne vor, müssen diese nicht jeweils gleiche Längen aufweisen.

$$b_1 = l_m = A_{Tfl} / l_{G1}$$

$$n_2 = l_{G2} / b_1 \quad \text{wobei } n_2 \text{ auf die nächste ganze Zahl zu runden ist.}$$

$$A_2 = A_{Tfl} / n_2$$

$$b_2 = 0,5 A_2 / l_2$$

$$n_3 = l_{G3} / b_2 \quad \text{wobei } n_3 \text{ auf das Vielfache von } n_2 \text{ aufzurunden ist.}$$

$$A_3 = A_{Tfl} / n_3$$

$$b_3 = 0,5 A_3 / l_3 .$$

mit

A_2, A_3 : Mittlere Einzugsgebietsgröße eines einzelnen Gewässers der Kategorie 2 oder 3 [km²]

b_1, b_2, b_3 : Mittlere Hanglänge, bezogen auf den Hang senkrecht zum Gewässer der Kategorie 1, 2 oder 3 [m]

l_1, l_2, l_3 : Mittlere Länge der Gewässer der Kategorie 1, 2 oder 3. [m]

l_{G1}, l_{G2}, l_{G3} : Längensumme der Gewässer der Kategorie 1, 2 oder 3 [m]

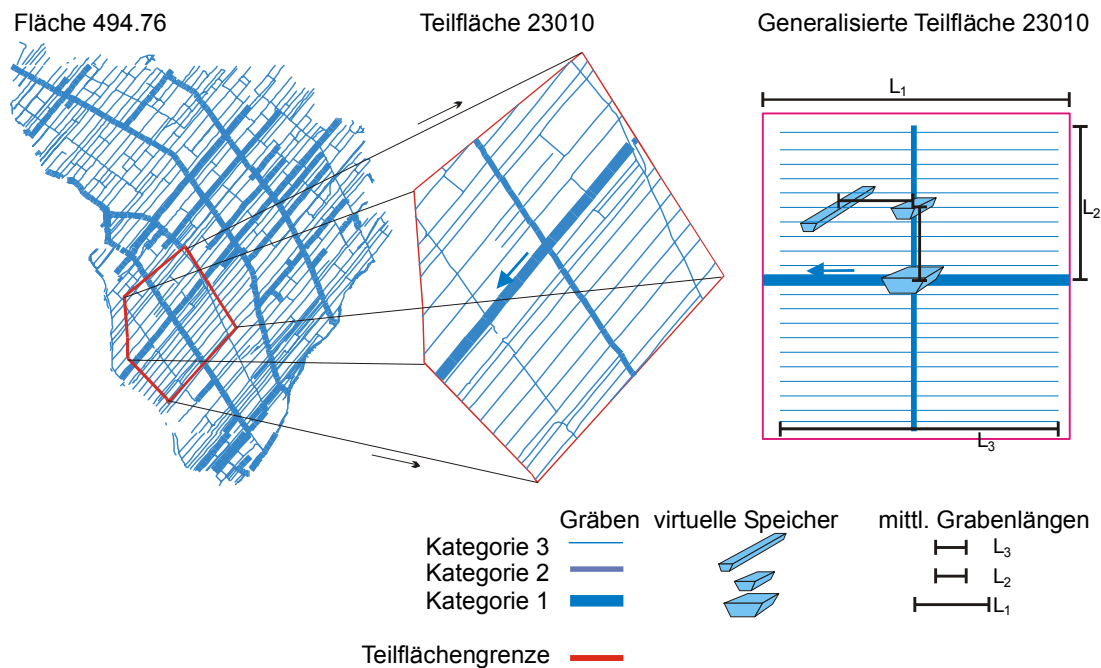


Abb. 3.3.1 Generalisierung des Gewässernetzes in Speicher am Beispiel der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum

(Fläche 494.76 aus: Hydrographische Karte Niedersachsen, 1983)

Der verfügbare Grabenstauraum des Gewässernetzes jeder Kategorie wird in jeweils einem Speicher KS_1 , KS_2 und KS_3 zusammengefasst, für die die Speicherinhaltslinien und die mittleren Abstände zu den anderen Speichern zu berechnen sind. Aus den mittleren Längen l_2 und l_3 wird der Abstand l_{Si} eines Speichers KS_i zum Folgespeicher KS_{i-1} aus der halben mittleren Länge der virtuellen Gräben berechnet.

$$l_{S2} = l_2 / 2$$

und

$$l_{S3} = l_3 / 2 .$$

mit

l_{S2} : Mittlere Entfernung zwischen Speicher KS_2 und KS_1 [m]

l_{S3} : Mittlere Entfernung zwischen Speicher KS_3 und KS_2 [m]

Beispiel:

Die Regel soll am Beispiel der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum (Abb. 3.3.1) mit den Kennwerten $A_{Tfl} = 1,2 \text{ km}^2$, $l_{G1} = 1\,218 \text{ m}$, $l_{G2} = 1\,110 \text{ m}$, $l_{G3} = 21\,030 \text{ m}$ erläutert werden:

$$b_1 = 0,5 A_{Tfl} / l_{G1} = 493 \text{ m}$$

$$n_2 = l_{G2} / b_{Tfl} = 2,25$$

Nach Runden von n_2 auf 2 wird die mittlere Hanglänge l_2 berechnet zu

$$l_2 = l_{G2} / 2 = 555 \text{ m}$$

und die Breite b_2 ergibt sich zu 1 083 m.

$$n_3 = l_{G3} / B_2 = 38,8 \text{ m}$$

Nach Runden von n_3 auf 40 wird

$$l_3 = l_{G3} / 40 = 526 \text{ m.}$$

Zwischen den Speichern der 1. und der 2. Kategorie ist der Abstand

$$l_{S2} = l_2 / 2 = 277,5 \text{ m}$$

und zwischen den Speicher der 2. und 3. Kategorie ist der Abstand

$$l_{S3} = l_3 / 2 = 263 \text{ m.}$$

Schritt 2: Berechnung der hypsografischen Kurve aus dem DHM

Nach der Verschneidung des Shapefile Teilflächen mit dem DHM wird eine hypsografische Kurve (Abb. 3.3.2) berechnet, also die Höhenverteilung über die Fläche. Die Kurve kann auf mehreren tausend Rasterzellen je Teilfläche basieren und wird daher mittels des Douglas-Peucker-Algorithmus (nach De Halleux, 2002, modifiziert) generalisiert. Hierbei hat sich die Reduktion auf maximal 16 Stützstellen als ausreichend für die Wiedergabe der Topografie erwiesen.

Schritt 3: Berechnung der Speichereinhaltslinien

Den Gewässerkategorien ist jeweils ein Regelprofil (Trapez-) zuzuordnen (vgl. Abb. 5.2.3). Den Hauptgerinnen (Kategorie 1) können alternativ aufgemessene, unregelmäßige Querprofile zugeordnet werden. Der Speicherinhalt bis zum Wasserstand bei bordvollem Abfluss wird durch Multiplikation der Querprofilfläche mit der Längensumme der Gräben berechnet zu

$$S_{KSi} = A_{Pi} l_{Gi} .$$

mit:

S_{KSi} : Speicherinhalt für den Speicher der Kategorie i [m³]

A_{Pi} : Fläche des Querprofils für die Kategorie i [m²]

Die Flächen der Gräben der Kategorien 1 bis 3 werden durch Multiplikation der Grabenbreite bei bordvollem Abfluss mit der Längensumme der Gräben berechnet (Tab. 3.3.1) zu

$$A_i = b_{Pi} l_{Gi} .$$

mit:

A_i : Fläche des Gewässers der Kategorie i bei bordvollem Abfluss [m²]

b_{Pi} : Breite des Querprofils bei bordvollem Abfluss [m]

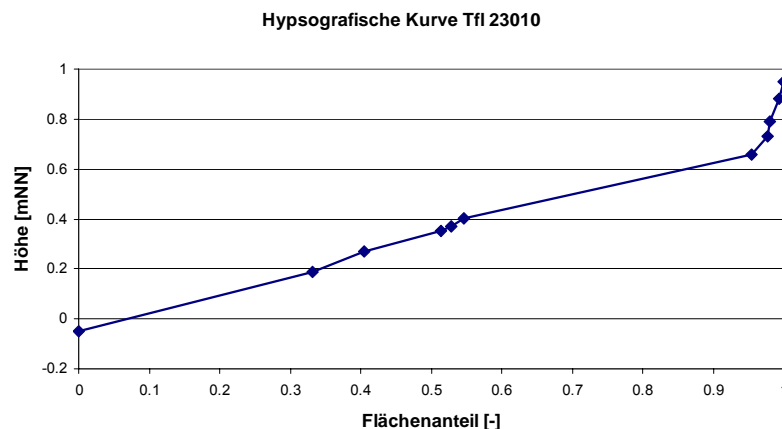


Abb. 3.3.2 Hypsografische Kurve für die Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum

Tab. 3.3.1 Grabenlängen, Grabenflächen und Flächenanteil der Gräben an der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum ($A_{Tfl} = 1,2 \text{ km}^2$)

Kategorie	Längensumme L_{Gn} [m]	Anzahl und Länge [m] der virtuellen Gräben	Fläche der Gräben [m ²]	Flächenanteil der Gräben
1	1 218	1 / 1 220	12 180	1,02 %
2	1 110	2 / 554	5 550	0,46 %
3	21 030	40 / 526	54 678	4,56 %

Die Regelprofile weisen nur relative Höhenordinaten auf. Es wird für die Umrechnung in Höhe über NN angenommen, dass das Gewässernetz im tiefsten Bereich der Teilfläche und damit am linken Rand der hypsografischen Kurve (Abb. 3.3.3) liegt. Die Oberkante der Regelprofile wird anhand des Flächenanteils der Gräben aus der hypsografischen Kurve abgegriffen. Virtuelle Gräben der 2. und 3. Kategorie liegen orografisch betrachtet höher und auf der hypsografischen Kurve in Abb. 3.3.3. weiter rechts als die Gräben der 1. Kategorie. Der Flächenanteil oberhalb der hypsografischen Kurve (blau gestrichelte Fläche in Abb. 3.3.3) entspricht nach Multiplikation mit der Teilflächengröße dem verfügbaren Stauraum im Vorland. Dieser Stauraum wird anteilig nach der Längensumme jeder Grabenkategorie den Speicherinhaltslinien der drei Speicher zugeschlagen. Abb. 3.3.4 zeigt die Speicherinhaltslinien für die drei Speicher der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum.

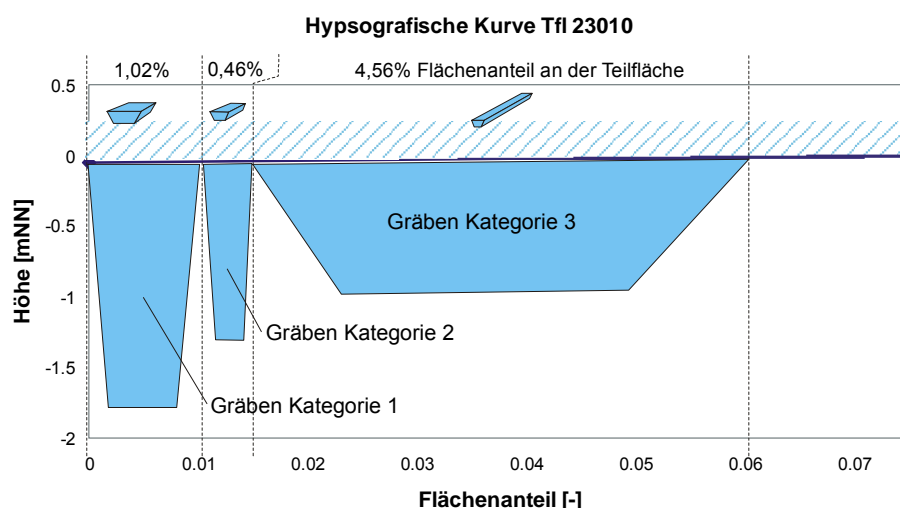


Abb. 3.3.3 Schema der Einordnung der Grabenquerschnitte in die hypsografische Kurve nach den Flächenanteilen jeder Grabenkategorie am Beispiel der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum

Bei der Teilfläche 23010 ist oberhalb -0,5 mNN der Grabenstauraum der Gräben der Kategorie 3 größer als der Grabenstauraum des Hauptgerinnes. Bei bordvollem Wasserstand (ca. -0,05 mNN) ist der Grabenstauraum der kleinsten Grabenkategorie größer als der Grabenstauraum der größeren Kategorien 1 und 2 zusammen (Abb. 3.3.4).

Die aus dem Gewässernetz abgeleiteten Speicher KS_1 , KS_2 und KS_3 bilden die Basis für den in Kap. 4.4 vorgestellten Kettenspeicheransatzes des Verfassers.

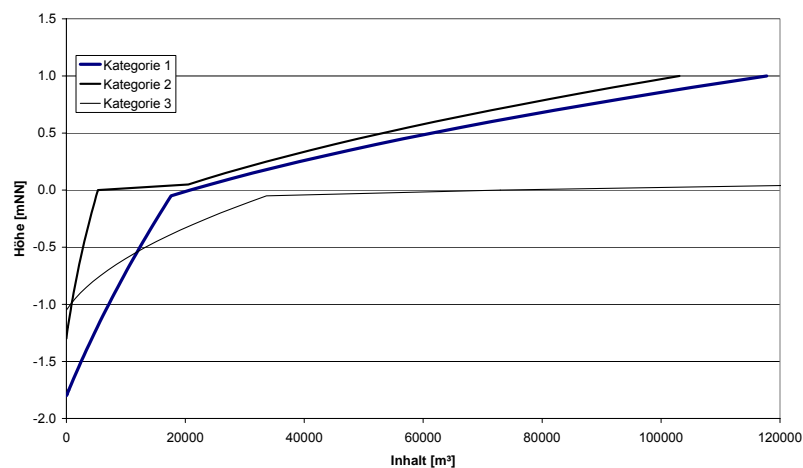


Abb. 3.3.4 Speicherinhaltslinien der Speicher der Teilfläche 23010 aus dem FGM Lesum

4 Hydrologische Simulation der Abflüsse in rückstaubeeinflussten Gebieten

4.1 Abfluss- und Wasserstandsberechnung

Bei der Abflussberechnung in einem Fließquerschnitt sind stationäre und instationäre Abflüsse zu unterscheiden. Instationäre Abflüsse können bei langsamen Änderungen der Wasserstände auch quasistationär, d. h. als zeitliche Abfolge stationärer Abflüsse, berechnet werden. Sind Abfluss und Fließgeschwindigkeit über mehrere Querschnitte konstant, spricht man von stationär gleichförmigem oder auch Normalabfluss. Normalabfluss liegt vor, wenn Sohlgefälle I_x , Wasserspiegelgefälle I_w und Energieliniengefälle I_E identisch sind (s. Abb. 4.1.1).

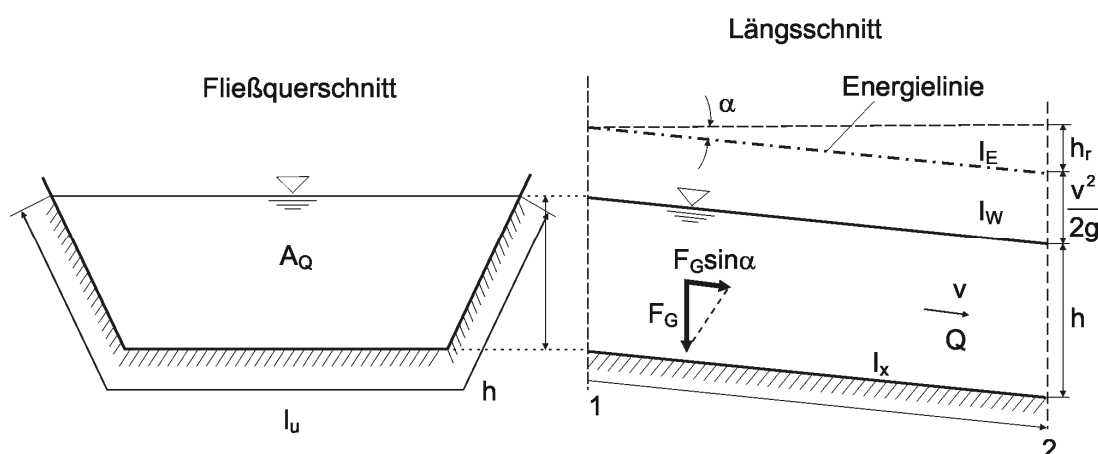


Abb. 4.1.1 Normalabfluss zwischen Querschnitt 1 und 2

(nach: Bollrich, 1992, S. 243)

Hochwasserwellen in Flussläufen können als instationäre Abflussprozesse durch eine relativ langsame, aber nicht zu vernachlässigende zeit- und ortsabhängige Variation wichtiger Parameter wie Abfluss, Wasserstand, Fließquerschnitt und Fließgeschwindigkeit, Sohl- und Energieliniengefälle und Rauheitsbeiwert charakterisiert werden. Um den natürlichen, dreidimensionalen Abflussvorgang hinreichend genau wiedergeben zu können, werden mathematische Modelle angewendet. Sie basieren auf den Grundgleichun-

gen der instationären Gerinneströmung, die vereinfachte Modelle einer extrem komplexen Naturerscheinung darstellen (Bollrich, 1989).

Die Berechnung von Wasserständen bei stationären und instationären Abflüssen ist eine Domäne hydrodynamisch-numerischer (HN) Modellansätze. Bei HN-Modellen wird der Abfluss als Randbedingung bzw. Eingangsgröße vorgegeben. Einige Modellkonzepte koppeln daher ein HN- mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell (N-A-Modell), wobei das N-A-Modell die Flächenabflüsse berechnet und für die Abfluss- und Wasserstandsberechnungen an das HN-Modell übergibt (DVWK, 1999). Wegen des hohen Rechenaufwandes und der zahlreichen Parameter zur Kennzeichnung der geometrischen hydraulischen Gerinnebeschaffenheit bei der Abflusssimulation ganzer Flussgebiete ist jedoch die HN-Simulation in der Praxis bei Flussgebietsmodellen nicht verbreitet. Wegen des erforderlichen Rechen- und Parameteraufwandes finden zwei- und drei-dimensionale HN-Modelle in operationellen Flussgebietsmodellen praktisch keinen Einsatz und werden daher hier nicht näher behandelt.

Das instationäre Abflussgeschehen kann als Bewegungsvorgang durch die eindimensionalen St.-Venant'schen Differentialgleichungen beschrieben werden. Für eine vollständige Beschreibung der hier verkürzt wiedergegebenen Gleichungen und Ableitungen wird auf weiterführende Literatur wie z. B. Bollrich (1989) verwiesen. Die Gleichungen bestehen aus der Kombination der Kontinuitätsgleichung (Gl. 4.1.1) und einer Bewegungsgleichung (als Impuls- oder Energiegleichung) (Gl. 4.1.2). Die Größen veranschaulicht Abb. 4.1.2. Die Kontinuitätsgleichung folgt zu

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = 0, \quad \text{wobei } b=b(h) \text{ ist.} \quad (\text{Gl. 4.1.1})$$

Im Impulssatz ist die geometrische Summe der an einer Flüssigkeitsmasse angreifenden Kräfte gleich der Änderung des Impulsstromes dieser Masse

$$\sum F = - \rho A \, dv \, \frac{dx}{dt}. \quad (\text{Gl. 4.1.2})$$

Die eindimensionale Bewegungsgleichung ergibt sich durch Einsetzen der Einzelkräfte in Gl. 4.1.2.

$$\text{Druckkraft } F_D = -\rho g A \left(\frac{\delta y}{\delta x} - \frac{\delta z}{\delta x} \right) dx, \quad (\text{Gl. 4.1.3})$$

$$\text{Gewichtskraft } F_G = \rho g A \left(-\frac{\delta z}{\delta x} dx \right), \quad (\text{Gl. 4.1.4})$$

$$\text{und Reibungskraft } F_R = -\rho g \frac{Q |Q|}{A^2 k_{St}^2 r_{hy}^{4/3}} . \quad (\text{Gl. 4.1.5})$$

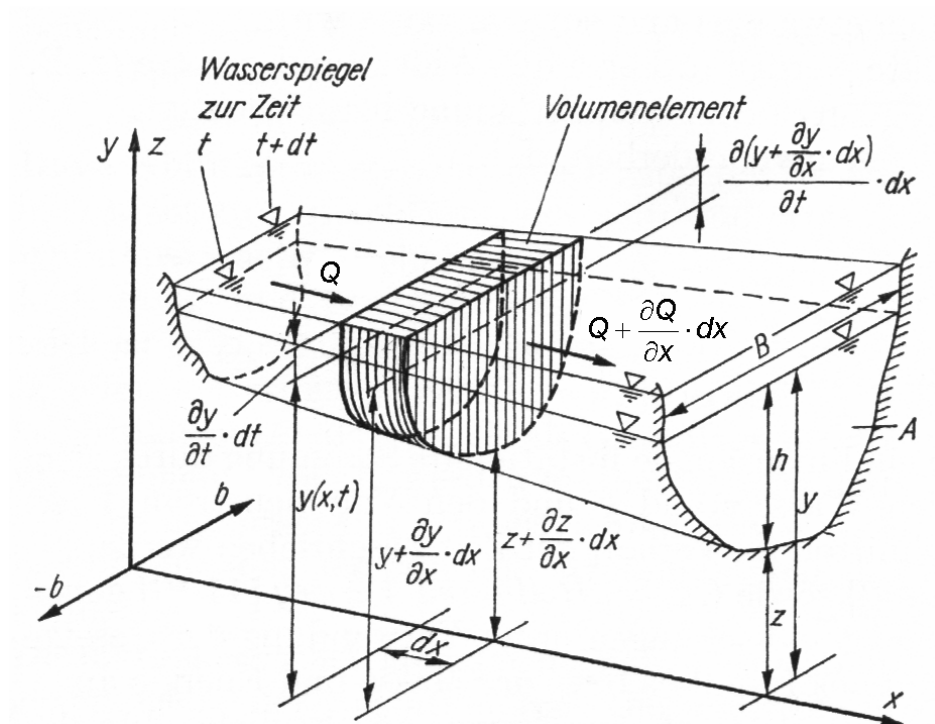


Abb. 4.1.2 Volumenelement der Länge dx eines Fließabschnitts
(aus: Bollrich, 1989, S. 638, verändert)

Durch Ersatz der Ordinate y durch die Wassertiefe h

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dh}{dx} + \frac{dz}{dx} = \frac{dh}{dx} - I_s$$

und beim Einsetzen von

$$I_E = \frac{Q |Q|}{A^2 k_{St}^2 r_{hy}^{4/3}}$$

wird die Gleichung umgeformt nach den Regeln der Differentiation zur Bewegungsgleichung

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q}{A} \cdot b \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - \left(\frac{Q^2}{A^2} \cdot b - g \cdot A \right) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} - I_s \right) \\ - \frac{Q^2}{A^2} \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)_{h=\text{const}} + g \cdot A \cdot I_E = 0 \end{aligned} \quad (\text{Gl. 4.1.6})$$

Mit $Q=v A(h)$ kann Gl. 4.1.6 vereinfacht werden.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g I_E = 0 \quad (\text{Gl. 4.1.7})$$

mit

ρ :	Dichte des Wassers	[kg/m ³]
A:	Querschnittsfläche	[m ²]
g:	Erdbeschleunigung (9,81 m/s ²)	[m/s ²]
r_{hy} :	Hydraulischer Radius	[m]
I_s :	Sohlgefälle	[m/m]
I_E :	Energiegefälle	[m/m]
b:	Breite des Querschnitts	[m]

Den Gleichungen liegen die Annahmen zugrunde, dass das Gewässer als Stromröhre mit horizontaler Wasseroberfläche quer zur Fließrichtung aufgefasst wird und sich der Fließquerschnitt in Fließrichtung nur allmählich verändert. Schubspannungen sind vernachlässigt oder durch die Boden- oder Sohlreibung mit erfasst, welche damit die ausschlaggebende Kalibrierungsgröße bei 1D-Modellen ist (DVWK, 1999, S. 219f). Energie-, Wasserspiegel- und Sohlgefälle sind klein, so dass für den Winkel α mit der Horizontalen gilt: $\cos \alpha = 1$ und $\sin \alpha = \tan \alpha$ (vgl. Abb. 4.1.1). Die Dichte des Wassers sei konstant.

Da die St.-Venant-Gleichungen geschlossen nicht lösbar sind, werden numerische Lösungsverfahren eingesetzt, wobei im allgemeinen implizite und explizite Differenzenverfahren sowie Charakteristikenverfahren unterschieden werden. Diese sog. dynamischen Verfahren berechnen unter Verwen-

dung von Anfangs- und Randbedingungen schrittweise die allmählich veränderliche instationäre Gerinneströmung, wobei eine Diskretisierung in Orts- und Zeitrichtung vorgenommen wird und die Differentialquotienten durch Quotienten endlicher Differenzen angenähert werden (Bollich, 1989, S. 646). Bei expliziten Verfahren werden Unbekannte wie Geschwindigkeit oder Wasserstand an einem Knoten jeweils einzeln aus den Werten der Nachbarknoten des vorangegangenen Zeitschritts berechnet, wodurch der Rechenaufwand begrenzt wird. Explizite Lösungsverfahren wie z. B. nach Lax-Wendroff sind in Rother (1974) oder Maniak (1997) enthalten, ein Beispiel für das Charakteristikenverfahren ist in Bollich (1989, S. 587ff und S. 646ff) vorgestellt. Die expliziten Verfahren und die Charakteristikenverfahren müssen die Courant-Bedingung (Gl. 4.1.8) einhalten, wodurch die Größe der Zeitschritte Δt und die Abstände Δx zwischen Knoten begrenzt wird.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v + (g A/b)^{1/2}} \quad (\text{Gl. 4.1.8})$$

Implizite Verfahren, bei denen alle Unbekannten des aktuellen Zeitschritts durch ein Gleichungssystem aus allen Werten des vorangegangenen Zeitschritts berechnet werden, sind rechenaufwändiger, aber unabhängig vom Zeitschritt numerisch stabil. Implizite Verfahren können schneller als explizite Verfahren rechnen, wenn die Zeitschritte entsprechend größer gewählt werden (DVWK, 1999, S. 23f).

Zur Lösung der Differentialgleichungen kann das Verfahren der finiten Differenzen verwendet werden. Im HN-Modell ISIS, das vom Verfasser für Vergleichszwecke verwendet wird, werden die partiellen Gradienten für Q , v und A durch finite Differenzen ersetzt. Die Genauigkeit der Lösung hängt dabei von der Größe der gewählten Zeitschrittweite Δt und der Strecke Δx ab. Als Berechnungsverfahren wird in ISIS das 4-Punkte-Schema nach Preissmann angewendet (Abb. 4.1.3). Nach Bollich (1989, S. 652ff) wird die Bewegungsgleichung 4.1.6 umgeformt zu

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g \cdot A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{2 \cdot b \cdot Q}{g \cdot A^2} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{Q^2}{g \cdot A^3} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} = - \frac{Q \cdot |Q|}{A^2 \cdot k_{\text{St}}^2 \cdot r_{\text{hy}}^{4/3}} \quad (\text{Gl. 4.1.9})$$

Die Differentialquotienten werden durch folgende Differenzenquotienten ersetzt:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{QP + QM}{\Delta t} - \frac{QL + QR}{\Delta t} \right) \quad \text{und}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{hP + hM}{\Delta t} - \frac{hL + hR}{\Delta t} \right)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} \approx \frac{\Delta h}{\Delta x} = \Phi \frac{hM - hP}{\Delta x} + (1 - \Phi) \cdot \frac{hR - hL}{\Delta x} \quad \text{und}$$

$$\frac{\partial A}{\partial x} \approx \frac{\Delta A}{\Delta x} = \Phi \frac{AM - AP}{\Delta x} + (1 - \Phi) \cdot \frac{AR - AL}{\Delta x}$$

mit $0,5 < \Theta \leq 1,0$

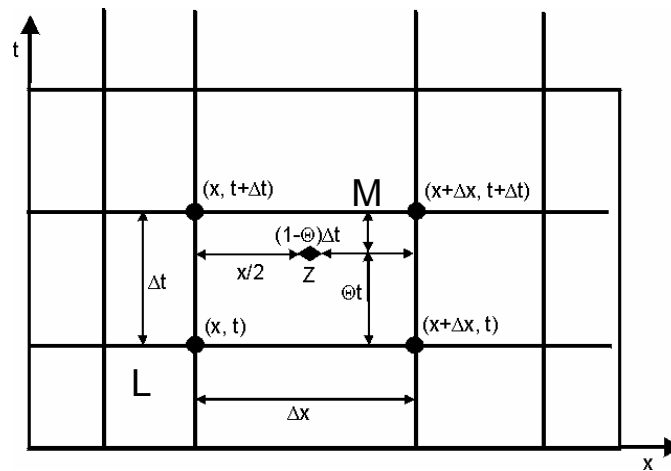


Abb. 4.1.3 4-Punkte-Schema nach Preissmann

(aus: Bollrich, 1989)

Die Wahl des Koeffizienten Θ hängt von den konkreten Anwendungsbedingungen des Modells ab und muss durch Proberechnungen bestätigt werden. Wird $\Theta = 1$ gewählt, so ergeben sich folgende Differenzenquotienten:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta h}{\Delta t} &= \frac{1}{2\Delta t} \cdot (h_P + h_M - h_L - h_R) \\ \frac{\Delta Q}{\Delta t} &= \frac{1}{2\Delta t} \cdot (Q_P + Q_M - Q_L - Q_R) \\ \frac{\Delta h}{\Delta x} &= \frac{h_M - h_P}{\Delta x} \\ \frac{\Delta A}{\Delta x} &= \frac{A_M - A_P}{\Delta x} .\end{aligned}$$

Neben der Aufstellung der Differenzenquotienten muss eine Linearisierung der Gleichungen durch Mittelung der geometrischen Größen für A, b, Q, M und R erfolgen. Diese Mittelung wird über alle vier Punkte für Koeffizienten bei Δt bzw. über die Punkte M und P für Koeffizienten bei Δx durchgeführt:

$$\begin{aligned}b_t &= \frac{1}{4} \cdot (b_L + b_R + b_P + b_M) \\ A_t &= \frac{1}{4} \cdot (A_L + A_R + A_P + A_M) \\ Q_t &= \frac{1}{4} \cdot (Q_L + Q_R + Q_P + Q_M)\end{aligned}$$

bzw.

$$\begin{aligned}b &= \frac{1}{2} \cdot (b_P + b_M) \\ A &= \frac{1}{2} \cdot (A_P + A_M) \\ R &= \frac{1}{2} \cdot (R_P + R_M) \\ M &= \frac{1}{2} \cdot (M_P + M_M) \\ Q &= \frac{1}{2} \cdot (Q_P + Q_M) .\end{aligned}$$

Diese Größen können in die Gl. 4.1.1 und Gl. 4.1.9 eingesetzt werden

$$\frac{h_M - h_P}{\Delta x} + \frac{Q_P + Q_M - Q_L - Q_R}{2gA_t \Delta t} - \frac{b_t Q_t}{g \cdot A_t^2 \Delta t} (h_P + h_M - h_L - h_R) - \frac{Q}{2gA^2} \left(\frac{AM - AP}{\Delta x} \right) (Q_P + Q_M) = - \frac{(Q_P + Q_M) \cdot |Q|}{2A^2 k_{St}^2 r_{hy}^{4/3}}$$

und nach Umformung ergibt sich:

$$-Q_P + F \cdot h_P + Q_M + F \cdot h_M = E$$

$$Q_P + C \cdot h_P + Q_M + D \cdot h_M = G$$

mit den Koeffizienten

$$C = - \frac{1 + \frac{b_t}{g \cdot A_t^2} \cdot Q_t \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}}{N}$$

$$D = \frac{1 - \frac{b_t}{g \cdot A_t^2} \cdot Q_t \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}}{N}$$

$$E = \frac{b_t \cdot \Delta x}{2 \cdot \Delta t} \cdot (h_R + h_L)$$

$$F = \frac{b_t \cdot \Delta x}{2 \cdot \Delta t}$$

$$G = \frac{\frac{\Delta x}{2gA_t \cdot \Delta t} \cdot (Q_R + Q_L) - \frac{b_t \cdot \Delta x}{gA_t^2 \cdot \Delta t} \cdot Q_t \cdot (h_R + h_P)}{N}$$

$$N = \frac{Q}{2A^2 k_{St}^2 r_{hy}^{4/3}} \cdot \Delta x + \frac{\Delta x}{\Delta t \cdot 2gA_t} + \frac{Q \cdot (AP - AM)}{2gA^3}.$$

Diese Gleichungen werden für alle n Teilabschnitte einer betrachteten Fließstrecke aufgestellt. Es ergeben sich zwei mal n Gleichungen mit $2(n+1)$ Unbekannten. Das so erhaltene Gleichungssystem kann mit Hilfe mathematischer Lösungsverfahren (Eliminationsmethode oder ähnliche Lösungsverfahren) gelöst werden. Eine Lösung muss iterativ gefunden werden, da die Koeffizienten C , D , E , F und G von den zu berechnenden Werten Q_M und Q_P bzw. h_M und h_P abhängen.

Zur Lösung dieses Gleichungssystems müssen Randbedingungen formuliert werden. Diese Randbedingungen werden jeweils am Anfang ($x=0$) und am Ende ($x=x_R$) des Modells eingebaut, wodurch eine höhere Stabilität erreicht wird. Die untere Randbedingung wird durch eine Wasserstandsganglinie oder ein gesteuertes Wasserbauwerk gegeben. Die obere Randbedingung wird als Zuflussganglinie oder anhand vorgegebener Wasserstände eines gesteuerten Wasserbauwerks bereitgestellt. Startbedingungen, d.h. Zuflüsse, Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten, etc., müssen zum Zeitpunkt $t=0$ für jedes verwendete hydraulische Element (Querprofile, Speicher, Wehr) angegeben werden. Mit dem HN-Modell ISIS kann man Startbedingungen für alle Querschnitte zwischen linkem und rechtem Rand ermitteln, indem der instationären Berechnung eine stationäre Berechnung vorgeschaltet wird und die so an jedem Querschnitt berechneten Anfangswasserstände und -abflüsse für die instationäre Berechnung übernommen werden.

Vereinfachungen der Gleichungen nach St. Venant führen z. B. zur Kinematischen Welle oder zur Diffusionsanalogie. Wird die Bewegungs- oder Energiegleichung (Gl. 4.1.7) vernachlässigt, erhält man für geringe Wassertiefenänderungen ($\partial h / \partial x$ gering im Verhältnis zum Sohlgefälle I_x) die Gleichung der Kinematischen Welle, bei der der Abfluss direkt von der Wasserstandshöhe h abhängig ist: $QA = f(h)$.

Kinematische Wellen können wegen der Vernachlässigung des Bewegungsterms bei der Berechnung des Landflächenabflusses oder bei Flachlandflüssen eingesetzt werden, wenn die Änderungen des Durchflusses nur sehr langsam stattfinden und die Abflussbreite groß gegenüber der Gewässertiefe ist. Ohne Speicherterm dämpft sich die Welle auf ihrem Lauf flussabwärts nicht ab. Ändert sich die Wellengeschwindigkeit längs einer Flussstrecke nicht, entspricht die kinematische Welle einer reinen Translation ohne jede Wellenverformung. Werden die Beschleunigungsterme vernachlässigt, folgt die Bewegungsgleichung zu

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + g I_E = 0. \quad (4.1.10)$$

Aus der Kontinuitätsgleichung und Gl. 4.1.10 erhält man die Gleichung der Diffusionsanalogie bzw. die eindimensionale Diffusionsgleichung:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - c \frac{\partial Q}{\partial x} + c q \quad (\text{Gl. 4.1.11})$$

mit

c: Wellenfortpflanzungs-Geschwindigkeit $c = (1/b) (dQ/dh)$ [m/s]

D: Diffusions- oder Wellenabflachungskoeffizient [m²/s³]

Die Diffusionsanalogie findet Anwendung bei langsam ansteigenden Wellen, wenn Rückstauerscheinungen auftreten. Für die Gleichung 4.1.11 müssen, wie auch bei den Gleichungen 4.1.1 und 4.1.7, numerische Verfahren zur Lösung eingesetzt werden.

In N-A-Modellen werden häufig hydrologische Verfahren zur Abflussberechnung eingesetzt. Sie basieren auf einer vereinfachten physikalischen Beschreibung des Abflussprozesses und gehen von der Kontinuitätsgleichung aus. Der Bewegungs- oder Energiegleichung in 1D-HN-Verfahren, in der die Beschleunigungsglieder in Fließrichtung berücksichtigt sind, steht bei hydrologischen Ansätzen die Speicherinhalt-Abfluss-Beziehung gegenüber, die zur Beschreibung des Retentionsverhaltens herangezogen werden kann. Die Speicherinhalt-Abfluss-Beziehung wird als vereinfachte Abhängigkeit zwischen Speicherinhalt S (ggf. unter Einbeziehung weiter Größen wie z. B. Zufluss) und Abfluss $QA_{(t)}$ zur Beschreibung des instationären Abflussvorganges verwendet:

$$QA_{(t)} = f(S) \quad (\text{Gl. 4.1.12})$$

oder

$$QA_{(t)} = f(S, QZ_{(t)}) \quad (\text{Gl. 4.1.12a})$$

Die verschiedenen hydrologischen Verfahren unterscheiden sich u. a. durch verschiedene Annahmen hinsichtlich der Speicherinhalt-Abfluss-Beziehung (Maniak, 1997).

Bei der Kontinuitätsgleichung wird das Entwässerungssystem (z. B. Hochwasserrückhaltebecken oder ein Gewässerabschnitt) als Speicherraum betrachtet und die Speicherinhaltsänderung durch Zufluss $QZ_{(t)}$ und Abfluss $QA_{(t)}$ über die Zeit t erfasst:

$$QZ_{(t)} - QA_{(t)} = \frac{dS}{dt} \quad (\text{Gl. 4.1.13})$$

Für diskrete Zeitintervalle Δt lautet die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{QZ_{(t)} + QZ_{(t+\Delta t)}}{2} - \frac{QA_{(t)} + QA_{(t+\Delta t)}}{2} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (\text{Gl. 4.1.14})$$

mit

$$\Delta S = S_{(t+\Delta t)} - S_{(t)}$$

$QZ_{(t+\Delta t)}$:	Zufluss des nächsten Zeitschrittes $t + \Delta t$	$[m^3/s]$
$QA_{(t+\Delta t)}$:	Abfluss des nächsten Zeitschrittes $t + \Delta t$	$[m^3/s]$
$QZ_{(t)}$:	Zufluss des Zeitschrittes t	$[m^3/s]$
$QA_{(t)}$:	Abfluss des Zeitschrittes t	$[m^3/s]$
$S_{(t)}$:	Speicherinhalte am Ende des aktuellen Zeitschrittes	$[m^3]$
$S_{(t+\Delta t)}$:	Speicherinhalte am Ende des nächsten Zeitschrittes	$[m^3]$

Mit der Speicherinhalt-Abfluss-Beziehung können Translation und/oder Retention im Gewässer durch funktionale Zusammenhänge wie Gl. 4.1.12a beschrieben werden. Da bei den verbreiteten hydrologischen Verfahren wie z. B. Einzellinearspeicher, Muskingum, Kalinin-Miljukov und Speicherkaskade (vgl. hierzu z. B. Maniak in: Mehlhorn, 1995, S. 56ff) die Wasserstände nicht berücksichtigt werden, können die Abflussveränderungen infolge Rückstau bei diesen Verfahren nicht explizit ausgedrückt werden.

Mit hydrologischen Ansätzen können Wasserstände abgeleitet werden, wenn eine Wasserstand-Abfluss-Beziehung (Abflusskurve) vorliegt. Die Abflusskurve kann gemessen oder rechnerisch ermittelt werden. Bei zeitinvarianten Modellkonzepten werden die Abflusskurven häufig für den Rechenzeitraum konstant angenommen.

Die Abflussganglinie $QA_{(t)}$ und Wasserstandsganglinie $W_{(t)}$ können mit der Kontinuitätsgleichung und Speicherinhalt-Abfluss-Beziehung bei gegebener Zuflussganglinie $QZ_{(t)}$ z. B. mit dem Seeretentionsverfahren oder der Modified Puls Method (Maniak, 1997) berechnet werden, wenn eine Wasserstand-Speicherinhalt-Beziehung und eine Abflusskurve vorliegen (Abb. A4 im Anhang). Diese Verfahren berechnen das Retentionsverhalten von Wasser-

körpern mit weitgehend horizontaler Wasserspiegellage, bei denen der Abfluss direkt vom Wasserstand abhängt. Die Genauigkeit der Wasserstandsrechnung nimmt daher mit wachsender Länge der Gewässerabschnitte ab, weil dann eine horizontale Wasserspiegellage i. d. R. nicht mehr gegeben ist.

Mit dem Seeretentionsverfahren wird iterativ für einen Rechenzeitschritt anhand des vorgegebenen mittleren Zuflusses

$$QZ_m = \frac{QZ_{(t)} + QZ_{(t+\Delta t)}}{2} \quad (\text{Gl. 4.1.15})$$

ein mittlerer Abfluss

$$QA_m = \frac{QA_{(t)} + QA_{(t+\Delta t)}}{2} \quad (\text{Gl. 4.1.16})$$

berechnet. Nach der Anfangsschätzung des Abflusses am Ende des Zeitschrittes $QA_{(t+\Delta t)}$ wird mit $QA = f(S)$ der Speicherinhalt $S_{(t+\Delta t)}$ am Ende des Zeitschrittes geschätzt. Mit den Variablen $QA_{(t+\Delta t)}$ und $S_{(t+\Delta t)}$ werden Iterationen so lange durchgeführt, bis die Kontinuitätsgleichung (Gl. 4.1.14) innerhalb vorgegebener Fehlerschranken erfüllt wird.

Bei der Modified Puls Method (vgl. Maniak, 1997) werden Iterationsschritte umgangen, indem Gl. 4.1.14 umgestellt wird zu

$$\frac{S_{(t+\Delta t)}}{\Delta t} + \frac{QA_{(t+\Delta t)}}{2} = \frac{S_{(t)}}{\Delta t} + \frac{QA_{(t)}}{2} - QA_{(t)} + \frac{QZ_{(t)} + QZ_{(t+\Delta t)}}{2} \quad (\text{Gl. 4.1.17})$$

und die Beziehung zwischen Abfluss QA und Speicherinhalt S

$$QA = f\left(\frac{S}{\Delta t} + \frac{QA}{2}\right) \quad (\text{Gl. 4.1.18})$$

aufgestellt wird. Mit den aufsummierten Größen der rechten Seite der Gl. 4.1.18 kann eine Hilfsgrafik aufgestellt werden (Abb. 4.1.4). Bei bekannten $S_{(t)}$ und $QA_{(t)}$ wird anhand des mittleren Zuflusses (Gl. 4.1.15) die rechte Seite der Gl. 4.1.17 gelöst und der mittlere Abfluss (Gl. 4.1.16) aus der Hilfsgrafik interpoliert.

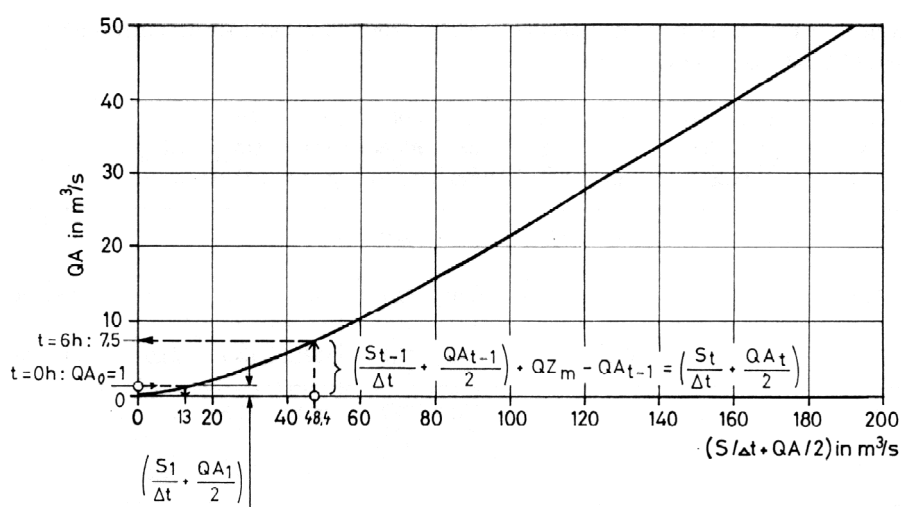


Abb. 4.1.4 Hilfsgrafik zur Puls-Methode

(aus: Maniak, 1997)

Bei der iterativen Lösung und bei der Puls-Methode müssen bei Rechenbeginn stationäre Verhältnisse $QZ_{(t=0)} = QA_{(t=0)}$ vorliegen. Der Anfangsspeicherinhalt kann über die Speicherinhalt-Abfluss-Beziehung aus dem Anfangsabfluss $QA_{(t=0)}$ berechnet werden. Eine Zusammenstellung der oben genannten Verfahren zur Abflussberechnung ist in Tab. 4.1.1 gegeben.

Sollen Wasserstände berechnet werden, müssen neben dem Abfluss die Geometrie des Abflussquerschnittes, das Sohl- oder Energiegefälle und die Rauheit des Gewässerbettes gegeben sein. Eine sowohl für hydrologische als auch hydrodynamisch-numerische Modelle wegen ihrer einfachen Anwendbarkeit häufig verwendete Fließformel ist die empirische Gleichung nach Manning-Strickler für offene Querschnitte

$$v = k_{St} r_{hy}^{2/3} \sqrt{I_W} \quad (\text{Gl. 4.1.19})$$

mit

$$Q = v A$$

Der Rauheitsbeiwert in Form des sogenannten Manning-Strickler-Beiwertes k_{St} stellt den einzigen Kalibrierungsparameter dar. Die Form des Fließquerschnitts wird nicht explizit berücksichtigt. Die Gleichung setzt voraus, dass näherungsweise gleichförmig-stationärer Abfluss vorliegt, also in der Bewegungsgleichung $dv/dt = 0$ und $dv/dx = 0$ sind.

Tab. 4.1.1 Verfahren zur Berechnung des Wellenablaufes
(nach Kinzelbach et al., 2003, verändert)

Hydrologische Verfahren	Hydraulisch-Numerische Verfahren		
Kontinuitätsgleichung, Speicher-Abfluss-Beziehung	Kontinuitätsgleichung, Bewegungsgleichung		
Linearspeicher, Speicher- kaskade, Muskingum-, Kalinin-Miljukov-, Puls- Verfahren, iteratives Seeretentionsverfahren	Kinematisches Modell	Diffusions- modell	Vollständiges HN-Modell
	Stark vereinfachte Bewegungs- gleichung	Vereinfachte Bewegungs- gleichung	Vollständige Bewegungs- gleichung
Direkte Lösung der Gleichungen; Bei Seeretentionsverfahren iterative Lösung	Numerische Methoden zur Lösung der Gleichungen		

Bei der Abflussberechnung in natürlichen Gewässern weisen Form und Rauheit Unregelmäßigkeiten Unregelmäßigkeiten auf, die eine Parameterbestimmung erschweren. Zur Lösung dieser Probleme setzen sich neben der Manning-Strickler-Formel auch andere Fließformeln wie z. B. die Darcy-Weisbach-Formel durch (Bollrich, 1992). Das Fließgesetz nach Darcy-Weisbach für stationären Abfluss lautet

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8 g r_{hy} I} \quad (\text{Gl. 4.1.20})$$

mit

λ : Widerstandsbeiwert $\lambda = f(\text{Re}, k_s/r_{hy}, \text{Querschnittsform}, \text{Rauheitsstruktur})$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k_s / r_{hy}}{14,84} \right)$$

k_s : Einzelrauheit [mm]

Re: Reynoldszahl [-]

und erlaubt durch den Widerstandsbeiwert λ eine detailliertere Berücksichtigung der bei gegliederten Querschnitten auftretenden Scherkräfte (DVWK, 1991). Die Einzelrauheit k_s wird mit der Einheit [mm] vorgegeben und kann sowohl homogenes Sohlenmaterial (z. B. Sand oder Kies) als auch Fließwiderstände bei unebener Fließgewässersohle oder überströmten Vorländern mit Bewuchs beschreiben. Werte für die Parameter Einzelrauheit k_s und Widerstandsbeiwert λ können der Fachliteratur (z. B. DVWK, 1991; Bollrich, 1992) entnommen werden.

Weist ein Fließquerschnitt unterschiedliche Rauheiten auf, kann ein mittlerer Manning-Strickler-Rauheitsbeiwert $k_{St,ges}$ z. B. nach Einstein (1934, in: Bollrich, Preißler, 1992) für den in n Abschnitte untergliederten, benetzten Umfang l_U berechnet werden:

$$k_{St,ges} = \left(\frac{l_U}{\sum_{i=1}^n [l_{Ui} / (k_{St,i})^{3/2}]} \right)^{2/3} \quad (\text{Gl. 4.1.21})$$

mit

$k_{St,ges}$:	Gemittelter Manning-Strickler-Rauheitsbeiwert	$[m^{1/3}/s]$
$k_{St,j}$:	Manning-Strickler-Rauheitsbeiwert des Abschnittes j	$[m^{1/3}/s]$
l_U :	Benetzter Umfang	$[m]$
l_{Ui} :	Benetzter Umfang eines Teilabschnitts i	$[m]$

Bei ausgeprägter Gliederung eines Querschnittes in Flussschlauch und Vorland (Abb. 4.1.5) kann der Abfluss nicht mit einem mittleren Rauheitsbeiwert berechnet werden, sondern wird mit einer Fließformel für jeden Abschnitt einzeln ermittelt. Interaktionen zwischen den Abschnitten verschiedener Fließgeschwindigkeiten durch Turbulenzen werden sowohl bei der Mittlung der Rauheitsbeiwerte als auch bei der abschnittsweise getrennten Abflussberechnung praktisch nicht berücksichtigt und führen zu einer fehlerhaften Abschätzung der Verlusthöhe h_v . Bei der getrennten Abflussberechnung von Flussschlauch und Vorland kann die fehlende Berücksichtigung der Turbulenz zu Fehleinschätzungen des Vorlandabflusses führen.

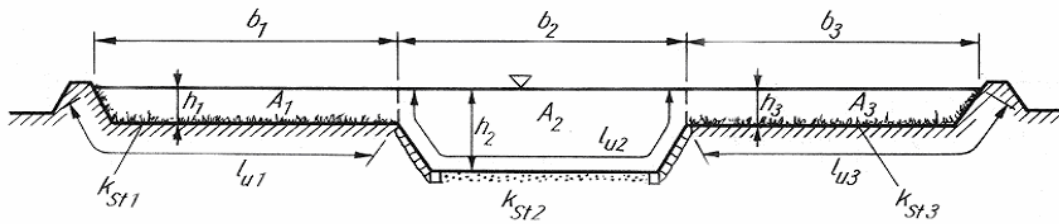


Abb. 4.1.5 Gegliederter Flussquerschnitt

(aus: Bollrich, Preißler, 1992; Unterschieden werden Abschnittsbreiten b , Fließtiefen h , durchflossene Querschnittsfläche A_Q , hydraulische Umfänge l_U sowie Rauheiten k_{St})

Weitet sich das Querprofil infolge durchströmter Vorländer stark auf, sind die Bedingungen der eindimensionalen Strömung, die Turbulenzen und Beschleunigungen normal zur Fließrichtung vernachlässigen, nicht mehr erfüllt und können zu rechnerischen Instabilitäten führen. Derartige Wechselwirkungen zwischen Hauptstrom und Vorländern können in eindimensionalen Modellen bisher noch nicht ausreichend beschrieben werden (BMU, 1997).

4.2 Abflussberechnung mit Rückstau

Die bei rückstaufreiem Abfluss straffe Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss an einem Gewässerquerschnitt zeigt ggf. Abweichungen, wenn z. B. Aufstau infolge Verkrautung entsteht. Dies gilt auch für die Mündungsbereiche von Nebenflüssen, die bei Hochwasser im Hauptfluss unter Rückstau leiden.

In tidebeeinflussten Gewässern besteht aufgrund des Rückstaus keine eindeutige Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss (LIESE, LUCK, 1973) und es kann zur Fließumkehr kommen. Gegenüber den Tidegewässern, in die die Gezeiten frei ein- und ausschwingen, ist das Abflussgeschehen in Sielgebieten einfacher nachzubilden, wenn sich die Durchflussrichtung nicht ändert. Eine Ausnahme bildet die Zuwässerung, die als manuell gesteuerter Vorgang jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung ist.

Das instationäre Abflussgeschehen während eines Sielzugs ist beeinflusst von der Außentide, dem Sielbauwerk und dem binnendeichs gelegenen Gewässernetz. Nach Kunz (1975) und Zillich (1977) sind folgende Parameter zu berücksichtigen:

- Verlauf der Tide am Siel,
- Abmessung und effektiver Durchflussquerschnitt des Siels bzw. seiner Verschlüsse,
- Geometrie und hydraulische Eigenschaften des Binnensieltiefs und seiner Zuflüsse und
- Füllung des Binnensieltiefs und der Seitengewässer während eines Sielzuges.

Am Sielbauwerk können die Parameter Binnentidehochwasser (BThw), Binnentideniedrigwasser (BTnw), Sielzugdauer (Dz), Absenkung während des Sielzuges (Hz) und Differenz BThw-BTnw gemessen werden. Der Kenterpunkt bezeichnet die Umkehr der Fließrichtung, d. h. den Wechsel von Ebbe- zu Flutstrom und umgekehrt (Abb. 4.2.1). Eine Skizze des Käseburger Siels ist zur Veranschaulichung in Abb. A5 im Anhang dargestellt.

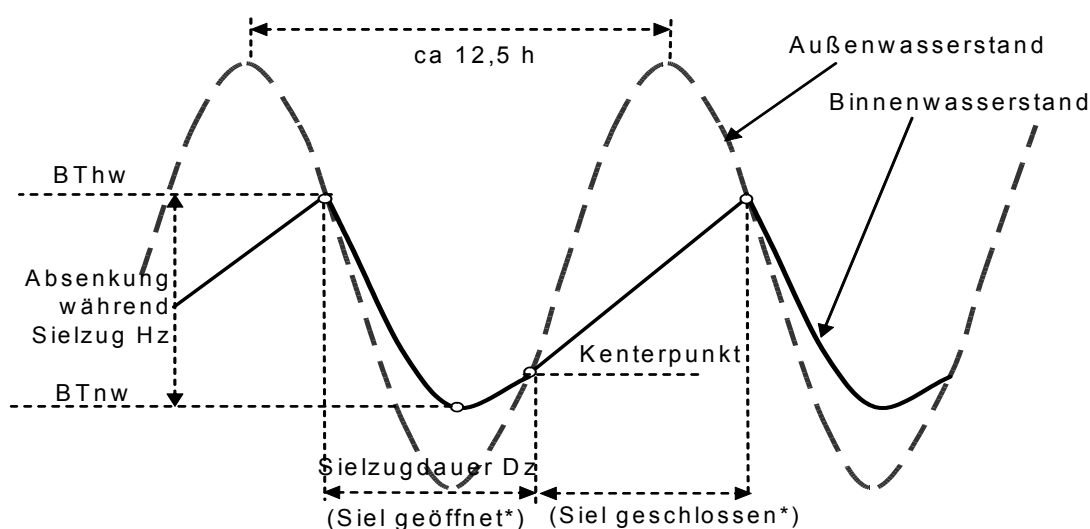


Abb. 4.2.1 Kennzeichnende Wasserstände am Siel

(nach Zillich, 1977, verändert)

*Siel kann verzögert öffnen oder schliessen

Soll der rückstaubeeinflusste Abfluss mit hydrologischen Verfahren berechnet werden, muss die Abflusskurve der Speicher in Abhängigkeit von den wechselnden Unterwasserständen ermittelt werden. Die für hydrologische Verfahren zu fordernde Ereignisunabhängigkeit der Parameter kann sich daher nicht auf die gesamte Abflusskurve, sondern nur auf Parameter wie z. B. die Rauheit an einem Querschnitt beziehen. Bei schnellen Änderungen

der Wasserstände, wie sie beim Öffnen eines Sieles oder dem Anspringen von Schöpfwerken auftreten, ist daher ggf. für jeden Rechenzeitschritt eine neue Abflusskurve zu berechnen.

Messal (2000) versucht mittels einer „Rückgestauten Linearen Speicherkaskade RLSK“, den Einfluss des Rückstaus auf den Abfluss zu quantifizieren. Die RLSK ist ein konzeptionelles Modell mit drei Parametern, das die bekannte lineare Speicherkaskade durch lineare Rückkopplung der einzelnen Speicherelemente auf das jeweils voranliegende Speicherelement erweitert. Der Ausfluss eines Speicherelementes ist somit eine Funktion seines Speicherinhaltes, dem Inhalt des folgenden Speichers und eines dimensionslosen Rückkopplungsfaktors a (Abb. 4.2.2). Ohne Rückkopplung ($a = 0$) gleicht die RLSK der gewöhnlichen Nash-Kaskade.

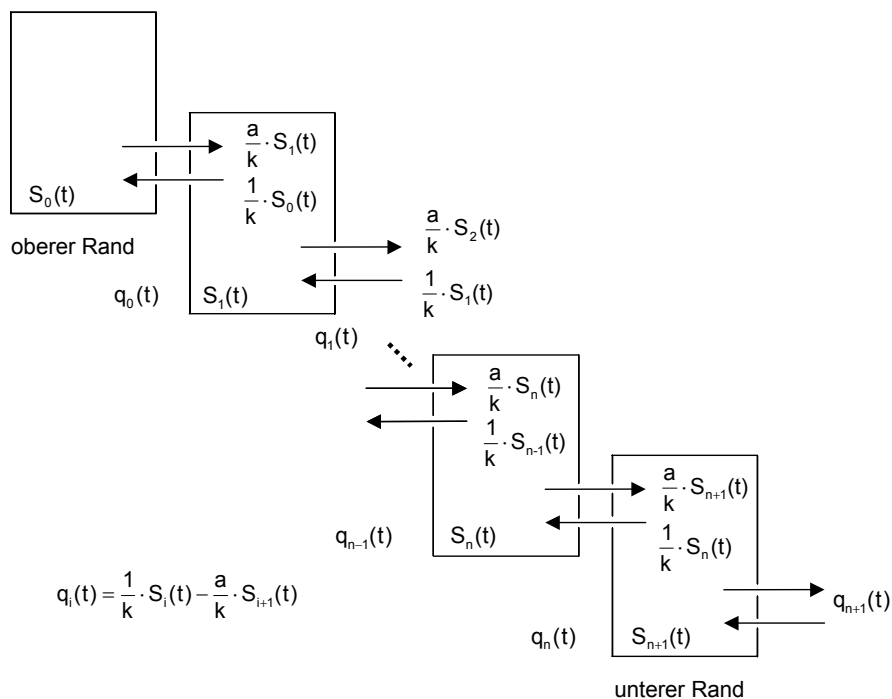


Abb. 4.2.2 Schema der Rückgestauten Linearen Speicherkaskade
(Messal, 2000)

Problematisch beim RLSK-Verfahren ist die Kalibrierung der drei konzeptionellen, messtechnisch nicht erfassbaren Modellparametern k , n und a für jeden Flussabschnitt. Veränderungen in Flussabschnitten wie z. B. durch Gewässerunterhaltung reduzierte Sohlrauheit oder eine Vergrößerung des Fließquerschnitts und Gewässerinhaltes können nicht durch einzelne Modellparameter ausgedrückt werden. Die Modellparameter sind dadurch nicht

regionalisierbar. Da bei der Abflussberechnung der Speicherinhalt des jeweils folgenden Speichers durch den Rückkopplungsfaktor a berücksichtigt wird, liegen mehrere Probleme auf der Hand:

- Der aktuelle Speicherinhalt des folgenden Speichers ist bei herkömmlicher Abarbeitungsreihenfolge von der Wasserscheide zum Gebietsauslass noch nicht berechnet, so dass auf den Speicherinhalt des folgenden Speichers aus dem vorangegangenen Zeitschritt zurückgegriffen werden muss und ein zeitschrittbedingter Fehler entsteht.
- Bei Einmündungen, wenn mehrere Speicher S_{O_i} in einen gemeinsamen unterstrom folgenden Speicher S_U entwässern, sind Speicherinhalt und Rückkopplung von S_U auch vom gleichzeitigen Zufluss aller zufließenden Speicher S_{O_i} abhängig. Der gegenseitige Einfluss aller Speicher S_{O_i} auf die Abflussberechnung kann nicht berücksichtigt werden, wenn die Abflüsse der Speicher S_{O_i} einzeln und nacheinander berechnet werden.
- Da ein Sielzug als instationärer Abflussprozess abläuft, kann vom Speicherinhalt bzw. vom Wasserstand im Sieltief nicht auf den Abfluss im Sieltief geschlossen werden. In Abhängigkeit vom Außenpeil kann der Abfluss an einem Siel bei jedem Binnenpeil bzw. bei jedem Speicherinhalt zu Null werden, so dass eine Rückkopplung zwischen zwei Speichern nicht durch einen konstanten Rückkopplungsfaktor a ausgedrückt werden kann.

Da bei der RLSK zeitvariante Rückkopplungen durch tidebedingte Wasserstände, Sielschließzeiten und einmündende Gewässer nicht berücksichtigt werden können und das Verfahren keine regionalisierbaren Modellparameter aufweist, ist es für den Einsatz in mesoskaligen, tidebeeinflussten Flussgebietsmodellen nicht geeignet.

Lange (1994) hat für das Flussgebietsmodell „Retentionsraum Allerknien“ das Modell HYREM (**H**ydrologisches **R**etentionsraum **M**odell) entwickelt. Die Flussabschnitte werden als Becken mit definierter Speicherinhaltslinie betrachtet, die Abarbeitung der Rechenprozesse erfolgt zeitschrittweise. Auf Basis der Kontinuitätsgleichung wird der Abfluss durch die mittleren Wasserstände der Flussabschnitte oberhalb und unterhalb vom jeweils betrachteten Querschnitt nach der Fließformel von Manning-Strickler (Gl. 4.1.19) berechnet.

Für die Abflussberechnung während eines Rechenzeitschrittes wird das Wasserspiegelgefälle I_w zwischen aktuellem Wasserstand eines Beckens i

und dem Wasserstand des vorangegangenen Zeitschrittes des in Fließrichtung nachfolgenden Beckens i+1 herangezogen:

$$Q = A k_{St} r_{hy}^{2/3} \sqrt{I_W} \cdot$$

mit

I_W :	Wasserspiegelgefälle zwischen den Speichern i und i+1: $I_W = dh / dL$	[m/m]
dh :	Wasserstands Differenz zwischen den Speichern i und i+1: $dh = W(i,t) - W(i+1,t-1)$	[m]
dL :	Fließlänge zwischen den Speichern i und i+1	[m]

Da bei der Abflussberechnung kein Bewegungsterm und keine Speicherinhalt-Abfluss-Beziehung berücksichtigt werden, wird Retention nicht nachgebildet. Es werden quasistationäre Bedingungen angenommen, der Ansatz ist auf langsame zeitliche Änderungen des Durchflusses beschränkt.

Rechnerisch folgt die Abflussberechnung dem Zufluss um einen Zeitschritt verzögert und enthält damit einen systematischen Fehler. Durch die Wahl hinreichend kleiner Zeitschritte, die bei HYREM im Sekundenbereich deutlich unter üblichen Schrittweiten bei der Speicherberechnung liegen, sollen quasistationäre Verhältnisse gewährleistet und der Zeitschrittfehler vernachlässigbar klein gehalten werden. Da alle Prozesse der Abflussbildung und -konzentration in gleichen Sekundenschritten berechnet werden müssen, resultiert ein hoher Rechenaufwand des Modells.

Programme wie z. B. SWMM von XP-Software (XP-Software, 2003), Pond Pack von Haestad (Haestad, 2003) oder WMS (Scientific Software Group, 2003) haben in der Simulation und Bewirtschaftung von einzelnen Speichern und verbundenen Speichern (interconnected ponds) einen Programmschwerpunkt. Sie verwenden hydrologische Ansätze (z. B. Modified Puls Method, Muskingum, nichtlineare kinematische Welle), wenn kein Rückstau vorliegt. Zur Simulation rückstaubeeinflusster Abflüsse werden hydrodynamische Ansätze nach den St. Venant Gleichungen verwendet.

Neben hydrologischen und hydraulischen Verfahren (Tab. 4.1.1) werden für die Berechnung des mittleren Abflusses während eines Sielzuges auch statistische Verfahren eingesetzt, bei denen anhand von Sielzugmessungen Korrelations- und Regressionsanalysen durchgeführt werden (z. B. Liese und Luck, 1973; Kunz, 1975; Köhler, 1977; Zillich, 1977; Meyer, 1983). Da diese

statistischen Verfahren auf die Berechnung mittlerer Abflüsse am Auslassbauwerk eines Sieltiefs beschränkt sind, gemessene Wasserstände voraussetzen und die Parameter nicht auf andere Gebiete übertragbar sind, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

4.3 Eingangsdaten für die mesoskalige hydrologische Abfluss- und Wasserstandsberechnung

N-A-Modelle sollten in der Lage sein, einerseits hoch aufgelöste räumliche Daten zu verarbeiten, wie sie GIS-Systeme und Datenbanken komfortabel verwalten können, andererseits muss die Modellstruktur auf allgemein verfügbaren Daten zugeschnitten sein (Kleeberg, 1992). Die Verfügbarkeit flächenhafter Parameter verbessert sich prinzipiell durch Fernerkundung und fortschreitende Digitalisierung von thematischen Karten (digitale Höhenmodelle, topografische Karten, BÜK, ATKIS, Corine Land Cover u.a.m.) ständig. Die Ermittlung von Angaben über Gewässerparameter für Simulationsrechnungen (Längs- und Querprofile, Bewuchssparameter, Bauwerke, aber auch Gewässergüteparameter) hält mit den Verbesserungen bei Flächenparametern zurzeit nicht Schritt, da sie meist aufwändiger ist.

Die begrenzte Verfügbarkeit von Angaben über das Gewässernetz zwingt zur Abstraktion durch Standardparameter. Hydrologische Ansätze zur Bestimmung der Konzentrationszeit oder der mittleren Fließgeschwindigkeit berücksichtigen in der Regel die gesamte Fließlänge, mittleres Gefälle und mittlere Sohlrauheit (z. B. Kirpich, 1940; Kerby, 1959; DVWK, 1984). Gewässerverläufe und die Schnittpunkte mit Höhenlinien zur Berechnung des mittleren Gefälles können dafür aus topografischen Landkarten entnommen werden. Die mittlere Sohlrauheit kann beim Vorliegen von gemessenen Abflussganglinien kalibriert werden.

Durch Fließprozesse entstandene Gerinnebettquerschnitte können in Abhängigkeit von Kennwerten des Flussgebiets (Größe, Form, Gefälle) abgeleitet werden, wenn natürliche Verhältnisse vorliegen. Die in NAXOS implementierte Fließgeschwindigkeitsberechnung für Gerinne ohne Rückstau basiert auf einem Verfahren von Rother (1974), der Gewässerquerschnitte in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße abgeleitet hat. Bei künstlich geschaffenen oder stark veränderten Gewässern wie dem Grabensystem in tidebeeinflussten Flussgebieten ist eine Ableitung des Gerinnebett-

querschnitts von der Einzugsgebietsgröße problematisch, weil bei Ausbau- und Erhaltungsarbeit i. d. R. Mindestquerschnitte eingehalten werden. Für die Modellierung kann daher auf Regelquerschnitte zurückgegriffen werden, die z. B. bei den Unterhaltungsverbänden vorliegen.

Die Ermittlung von Speicherinhaltslinien von Gewässerabschnitten wird notwendig, wenn Abfluss und Wasserstand mit hydrologischen Ansätzen berechnet werden sollen und die Speicherfunktion nichtlinear ist. Durch die geringen Flächen- und Fließgefälle, die in den untersuchten Gebieten Lesum und Käseburger Sieltief unter 0,5 ‰ liegen (vgl. Kap. 5), können die Grabensohlen als nahezu horizontal angenommen werden. Es kann daher ein strenger Zusammenhang zwischen Querschnitt, Tiefe, Länge und dem Speicherinhalt der Gräben angenommen und Speicherinhalte vereinfacht durch Multiplikation der Querprofilfläche mit der Grabenlänge vorgenommen werden. Für die Erfassung des potentiellen Abflussrückhalts bei Ausuferungen kann die Taltopografie berücksichtigt werden.

Bei einem engmaschigen Gewässernetz mit einer Gewässerdichte von über 10 000 m/km², die im tidebeeinflussten norddeutschen Küstengebiet häufig vorliegt (vgl. z. B. Tab. 3.x), kann im FGM bei der Simulation nicht jeder Graben einzeln berücksichtigt werden. Diese werden daher nach Länge, Lage, Breite und/oder Querschnittsfläche zusammengefasst und als verfügbarer Grabensstauraum berücksichtigt.

4.4 Entwicklung des Kettenspeicheransatzes für das Modell NAXOS

4.4.1 Definitionen

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein hydrologisches Verfahren entwickelt, welches die Simulation von Abflüssen unter Berücksichtigung von Rückstau und Fließumkehr ermöglicht. Das Verfahren, das als Modul im N-A-Modell NAXOS implementiert ist, berechnet den Zu- und Abfluss von ineinander einmündenden hydrologischen Speichern, die modelltechnisch miteinander verkettet sind. Durch den Begriff der Verkettung soll ausgedrückt werden, dass die Speicher im Modell nicht als voneinander unabhängige Fließabschnitte mit zeitinvarianten Parametern aneinandergereiht sind, sondern die Abflussberechnung von Zustandsvariablen angrenzender Speicher beeinflusst ist. Aus diesem Grund wird der Rechenansatz als *Kettenspeicheransatz* bezeichnet.

Ein Flusseinzugsgebiet ist durch Einmündungen im Gewässernetz in Teilflächen gegliedert. Jede Teilfläche enthält einen Flussabschnitt, der das Hauptgerinne darstellt. Es sei angenommen, dass Teilflächen hinsichtlich der Hauptentwässerungsrichtung nebeneinander oder in Fließrichtung hintereinander folgen. Das Gewässernetz einer Teilfläche mit Speicherinhaltslinie und rückstaubeeinflusstem Abfluss wird im Folgenden als einzelner *Kettenspeicher* KS bezeichnet (Abb. 4.4.1). Stehen Prozesse der Landfläche einer Teilfläche mit Kettenspeicher im Vordergrund, wird dagegen von der *Speicherteilfläche* gesprochen. Die Entwässerungsrichtung (bei freier Vorflut) wird als *Hauptfließrichtung* bezeichnet. Die Beschreibung der Lage von Teilflächen oder Kettenspeichern „oberhalb“ und „unterhalb“ bezieht sich stets auf die Hauptentwässerungsrichtung. Ein Querprofil wird, in Hauptfließrichtung betrachtet, am unteren Ende einer Teilfläche oder Speicherteilfläche vorgegeben. Wird das Gewässernetz in mehrere Grabenkategorien untergliedert, kann das Gewässernetz einer Teilfläche in drei Teil-Kettenspeicher KS_1 , KS_2 und KS_3 weiter untergliedert werden. KS_1 stellt das Hauptgerinne jeder Teilfläche dar und ist mit den einmündenden Hauptgerinnen angrenzender Teilflächen verknüpft.

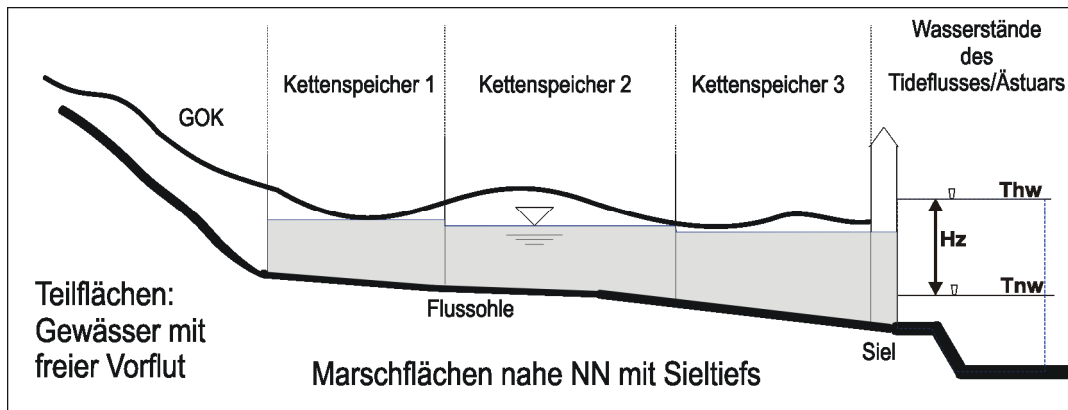


Abb. 4.4.1 Schematischer Schnitt durch ein Marscheinzugsgebiet mit Teilflächen bei freier Vorflut, drei rückstaubeeinflussten Kettenspeichern und tidebeeinflusstem Außenpeil unterhalb eines Sieles (GOK = Geländeroberkante)

4.4.2 Integration des Kettenspeicheransatzes in das Modell NAXOS

Das zu entwickelnde hydrologische Verfahren für die Berechnung von Abflüssen in rückstaubeeinflussten Gebieten soll in ein mesoskaliges, operationell einsetzbares N-A-Modell eingebunden werden. Das Modell soll die Bearbeitung von Flussgebieten bis weit über 1 000 km² Größe für Hochwasser- und Langfristsimulationen erlauben. Als Grundlage für das N-A-Modell sollen allgemein verfügbare Eingangsdaten dienen.

Durch die Implementierung des Kettenspeicheransatzes in das vom Verfasser entwickelte N-A-Modell NAXOS bestehen modellspezifische Vorgaben hinsichtlich der programminternen Abarbeitungsreihenfolge, Datei- und Datenverwaltung sowie der Variablenbereitstellung. Die räumliche Untergliederung von Einzugsgebieten in mesoskaligen hydrologischen Modellen bedingt, dass Gewässerabschnitte i. d. R. mehrere hundert Meter lang sind. Die berechneten Wasserstände stellen dabei einen Mittelwert über den Gewässerabschnitt dar.

Da der Wasserhaushalt in tidebeeinflussten Gebieten maßgeblich von Wasserbauwerken wie Sielen und Pumpen abhängt, ist auch die Simulation der Steuerung dieser Bauwerke notwendig (s. Kap. 4.5). Jahreszeitenabhängige Randbedingungen wie z. B. Meliorationswasserstände sind zu berücksichtigen.

Da bei hydrologischen Modellansätzen der Abfluss eines einzelnen Speichers - ohne Berücksichtigung des Wasserstands des in Fließrichtung folgenden Speichers - erst nach Ermittlung des mittleren Zuflusses über einen Zeitschritt berechnet und bilanziert wird, ist eine Rückkopplung zwischen benachbarten Speichern in herkömmlichen Verfahren nicht gegeben. In tidebeeinflussten Einzugsgebieten sind Fließgefälle und Fließgeschwindigkeit gering, es liegt strömender Abfluss vor. Schießender Abfluss kann vereinzelt bei unterdimensionierten Siele auftreten (Kunz, 1975). Störungen wie Stau und Querschnittsverengungen wirken sich bei strömendem Abfluss stromaufwärts aus, weshalb Wasserspiegelberechnungen bei HN-Verfahren stromauf durchgeführt werden (Bollrich, Preißler, 1992).

Bei der Abarbeitung einer Teilfläche werden rückstaubeeinflusste und nicht beeinflusste Abflüsse unterschieden. Abfluss von der Landfläche und von Teilflächen ohne Rückstau wird der Hauptfließrichtung folgend berechnet. In Mündungsbereichen kann der Zufluss zu Rückstau in den einmündenden Gewässern führen. Die Zuflüsse der einmündenden Gewässer dürfen nicht einzeln nacheinander ermittelt werden, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Die Berechnung des Abflusses einer Teilfläche wird daher bei Rückstau einfluss nicht bei der Abarbeitung der Teilfläche selbst, sondern zur Berücksichtigung aller Einmündungen erst bei der Abarbeitung der in Fließrichtung folgenden Teilfläche durchgeführt. Es resultiert eine Berechnung der Abflüsse entgegen der Hauptfließrichtung. Die Berechnung des Abflusses erfolgt nur beim in Fließrichtung untersten Speicher einer Speicherkette, für den wie bei einem HN-Modellen eine untere Randbedingung vorzugeben ist. Diese Randbedingung kann durch eine gemessene Wasserstandsganglinie oder ein Wasserbauwerk mit Abflusskurve gegeben sein.

4.4.3 Gleichungssystem und Programmablauf

4.4.3.1 Erweiterung des Seeretentionsverfahrens

Beim Seeretentionsverfahren werden Abfluss $QA_{(t+\Delta t)}$ und Speicherinhalt $S_{(t+\Delta t)}$ am Ende des Zeitschrittes $t+\Delta t$ geschätzt und ein mittlerer Abfluss

$$QAm = \frac{QA_{(t)} + QA_{(t+\Delta t)}}{2}$$

anhand der Kontinuitätsgleichung (Gl. 4.1.14) iterativ ermittelt (s. Kap. 4.1). Eine zeitinvariante Abhängigkeit des Abflusses vom Speicherinhalt wird meist angenommen, ist jedoch nicht erforderlich, um die Kontinuitätsgleichung zu erfüllen. Beim Kettenspeicheransatz wird für jeden Zeitschritt eine neue Abflusskurve anhand des aktuellen Wasserspiegelgefälles I_W zwischen oberliegendem Speicher S_O und unterliegendem S_U berechnet. Die bei der arithmetischen Mittelung der Abflüsse $QA_{(t)}$ und $QA_{(t+\Delta t)}$ vorausgesetzte Linearität zwischen den Speicherinhalten $KS_{KO(t)}$ und $KS_{KO(t+\Delta t)}$ soll auch gelten, wenn sich die Abflusskurve von einem Zeitschritt zum nächsten ändert:

$$QA = f(I_{W(t)}) \quad (\text{Gl. 4.4.1})$$

wird zu

$$QA = f(I_{W(t+\Delta t)}) \quad (\text{Gl. 4.4.1a})$$

mit

$$I_{W(t)} = W_{O1(t)} - W_{U(t)} / \Delta l_{UO1} \quad [\text{m/m}]$$

$$I_{W(t+\Delta t)} = W_{O1(t+\Delta t)} - W_{U(t+\Delta t)} / \Delta l_{UO1} \quad [\text{m/m}]$$

$$W_{O1(t)}: \text{Wasserstände des oberliegenden Speichers } KS_{O1} \text{ zum Zeitpunkt } t \quad [\text{mNN}]$$

$$W_{O1(t+\Delta t)}: \text{Wasserstände des oberliegenden Speichers } KS_{O1} \text{ zum Zeitpunkt } t+\Delta t \quad [\text{mNN}]$$

$$W_{U(t)}: \text{Wasserstände des unterliegenden Speichers } KS_U \text{ zum Zeitpunkt } t \quad [\text{mNN}]$$

$$W_{U(t+\Delta t)}: \text{Wasserstände des unterliegenden Speichers } KS_U \text{ zum Zeitpunkt } t+\Delta t \quad [\text{mNN}]$$

$$\Delta l_{UO1}: \text{Fließlänge zwischen Speicher } KS_{O1} \text{ und Speicher } KS_U. \quad [\text{m}]$$

Für einen Speicher kann daher eine Schar von Abflusskurven berechnet werden, die auf unterschiedlichen Wasserspiegelgefällen I_W und Speicherinhalten im Speicher S_O beruhen. Die Abflussordinaten können auch den Wert 0 einnehmen und bei Abfluss entgegen der Hauptentwässerungsrichtung negativ werden.

Fließformeln zur Berechnung des Wasserstandes in Abhängigkeit von stationärem Durchfluss (z. B. 4.1.19, 4.1.20; weitere in Bollrich, Preißler, 1992, S. 246ff) haben einen Parameter zur Beschreibung der Rauheit und z. T. einen Beiwert für die Gerinneform. Da bei der mesoskaligen Modellierung nicht davon ausgegangen werden kann, dass für alle Hauptgerinne Formparameter für das Querprofil bereitgestellt werden können, wird für die Berechnung der Abflusskurven von Kettenspeichern auf die Gleichung von Manning-Strickler (Gl. 4.1.19) zurückgegriffen.

Zur Minimierung der bei der Mittelung der Zu- und Abflüsse über einen Zeitschritt auftretenden Ungenauigkeiten werden die Zeitschritte bei der Berechnung des Kettenspeicherzu- bzw. abflusses programmintern in mindestens zwei Teilschritte untergliedert, die als *Sub-Zeitschritte* bezeichnet werden. Innerhalb der Sub-Zeitschritte werden die Zu- bzw. Abflüsse unter Bilanzierung der Speicherinhalte berechnet und anschließend für den gesamten Zeitschritt gemittelt. Bei Simulation von Regulierungsbauwerken beträgt die Länge eines Sub-Zeitschrittes pauschal eine Minute. Durch diese kurze Sub-Zeitschrittweite können innerhalb eines Zeitschrittes veränderte Außenwasserstände, Hubtor- oder Klappenstellungen bei der Abflussberechnung unabhängig von der gewählten Rechenschrittweite berücksichtigt werden.

4.4.3.2 Randbedingungen

Kettenspeicher werden anhand metrisch erfassbarer Größen Speicherinhaltslinie, Abflussquerschnitt und Fließlänge parametrisiert. Die Gerinne-
rauheit ist der einzige Kalibrierungsparameter für den Kettenspeicheransatz.

Für jeden Kettenspeicher müssen beim Rechenbeginn Anfangsbedingungen für Abfluss, Wasserstand und Speicherinhalt vorgegeben werden. Beim Simulationsbeginn wird für jeden Kettenspeicher ein Anfangsabfluss aus der Basisabflussspende berechnet. Die Anfangswasserstände und -speicherinhalte werden unter Annahme stationärer Abflüsse mittels der Abflusskurven der Kettenspeicher und Wasserbauwerke iterativ ermittelt. Wenn der Abfluss nicht durch geschlossene Wasserbauwerke unterbunden ist, nimmt der Basisabfluss von der Wasserscheide zum Gebietsauslass hin zu. Bei Rechenbeginn sind Wasserbauwerke geschlossen, wenn der Unterwasserstand (Außenpeil) höher als der Wasserstand des Kettenspeichers mit Wasserbauwerk (Binnenpeil) ist. Unterhalb geschlossener Wasserbauwerke ist der Basisabfluss Null. Durch Betriebspegel gesteuerte Wasserbauwerke sind

auch geschlossen, wenn der Wasserstand am Betriebspegel so niedrig ist, dass die Betriebsregeln ein Schließen des Bauwerks vorgeben (s. Kap. 4.5).

Als untere Randbedingung muss am Auslass, dem untersten Kettenspeicher in einer Speicherkette, eine Wasserstandsganglinie oder ein Wasserbauwerk mit Abflusskurve vorgegeben sein. Bei Wasserbauwerken, deren Abflüsse vom Außenwasserstand abhängen, muss ebenfalls eine Wasserstandsganglinie vorgegeben werden. Bei Schöpfwerken ist dies nicht der Fall.

Die Anfangswasserstände der oberhalb liegenden Kettenspeicher werden anhand der Anfangsabflüsse iterativ ermittelt. Da beim Simulationsbeginn ($t = 0$) stationäre Abflüsse angenommen werden, beeinflusst der Anfangswasserstand am Auslass die Anfangswasserstände und -speicherinhalte der oberhalb liegenden Kettenspeicher. Dies ist bei der Kalibrierung von Hochwasserereignissen zu berücksichtigen, bei denen der Anfangsspeicherinhalt des Grabensystems in der Größenordnung des effektiven Niederschlags von mehreren Tage liegen kann und somit die Kalibrierung der Modellparameter für den Landflächenabfluss beeinflusst. Der Anfangszeitpunkt der Berechnung ist z. B. auf den Kenterpunkt zu verschieben, wenn der Anfangswasserstand als Binnenpeil mit dem Außenwasserstand übereinstimmen soll.

4.4.3.3 Abarbeitung der Rechenschritte und Fallunterscheidungen

In jedem Rechenschritt des Zeitschrittmodells NAXOS werden die hydrologischen Teilprozesse Abflussbildung und -konzentration für alle Teilflächen (mit und ohne Kettenspeicher) in Fließrichtung abgearbeitet. Bei der Abflussberechnung wird in rückstaufreien Abfluss und rückstaubeeinflussten Abfluss (mit Kettenspeicher) unterschieden (vgl. Abb. 2.1.1). Der rückstaufreie Abfluss wird während der Abarbeitung der Teilfläche berechnet, der rückstaubeeinflusste Abfluss wird erst bei der Berechnung des Zuflusses des unterhalb folgenden Kettenspeichers berechnet. Liegen Wasserbauwerke vor, ist die Richtung der Abflussberechnung abhängig von der Steuerung bzw. den Modellparametern des Bauwerks: Ist beim Wasserbauwerk die Abflusskurve des aktuellen Zeitschritts unabhängig vom Außenpeil, wird der Abfluss bei der Abarbeitung des Kettenspeichers bzw. des Wasserbauwerks berechnet. Beeinflusst das Außenpeil die Abflusskurve, wird der Abfluss bei der Abarbeitung der Folgefläche berechnet.

Eine Teilfläche kann bis zu drei Kettenspeicher KS_1 , KS_2 und KS_3 für die Gräben der Kategorie 1, 2 und 3 aufweisen. Der Zufluss von der Landfläche zu den Kettenspeichern einer Teilfläche wird bei der Abarbeitung der Teilfläche auf die drei Kettenspeicher aufgeteilt. Der Zufluss zum Kettenspeicher der Kategorie i ist proportional der summarischen Grabenlänge I_{Gi} dieser Grabenkategorie:

$$QZ_{KSi} = QA_{SP,L} \cdot \frac{I_{Gi}}{I_G} \quad (\text{Gl. 4.4.2})$$

mit

QZ_{KSi} : Zufluss zum Kettenspeicher KS der Grabenkategorie i [m³/s]

$QA_{SP,L}$: Landflächenabfluss einer Speicherteilfläche [m³/s]

I_{Gi} : Gesamtlänge der Gräben der Kategorie i [m]

I_G : Gesamtlänge der Gräben [m]

Abflussberechnung zwischen Kettenspeichern ohne weitere Randbedingungen

Es wird bei der Berechnung des Abflusses zwischen einem unteren Kettenspeicher KS_U und einem oder mehreren einmündenden oberen Kettenspeichern KS_{Oi} unterschieden (Abb. 4.4.2). Der Bezeichner KS_U steht im Folgenden repräsentativ für einen Kettenspeicher, für den Zuflüsse berechnet werden. Als KS_{Oi} werden alle Kettenspeicher bezeichnet, die der Hauptfließrichtung folgend in KS_U münden. Ist KS_U das Hauptgerinne KS_1 einer Teilfläche, bilden die Teilkettenspeicher KS_1 aller oberhalb liegenden Teilflächen sowie der Teil-Kettenspeicher KS_2 die Kettenspeicher KS_{Oi} . Bei der Berechnung der Zuflüsse zu KS_2 von KS_3 innerhalb einer Teilfläche wird KS_2 als KS_U und KS_3 als KS_O bezeichnet.

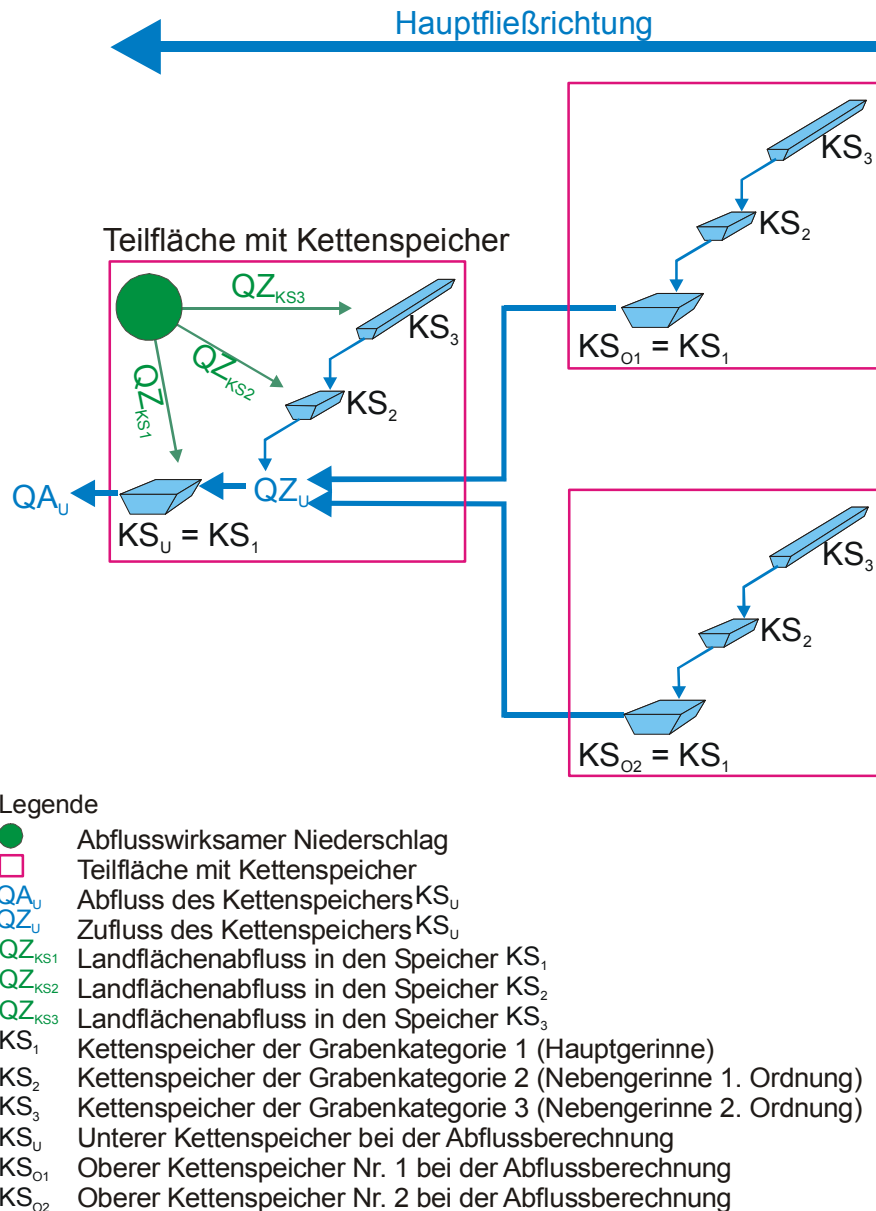


Abb. 4.4.2 Zu- und Abflüsse für das Hauptgerinne einer Teilfläche mit Kettenspeicher und Bezeichnung der Kettenspeicher bei der Abflussberechnung

Bei der Abarbeitung werden für die Kettenspeicher einer Teilfläche die mittleren Zuflüsse zwischen dem letzten und dem aktuellen Zeitschritt ermittelt. Die mittleren Abflüsse entsprechen im ersten Teilschritt den mittleren Abflüssen des letzten Rechenzeitschrittes. Der Speicherinhalt wird vorläufig bilanziert und der Wasserstand berechnet. Erst bei der Abarbeitung des unterhalb folgenden Kettenspeichers werden der mittlere Abfluss berechnet und der Speicherinhalt abschließend bilanziert, d.h. es führt jeweils ein unterer

Kettenspeicher KS_U die abschließende Berechnung der Abflüsse aller oberhalb einmündenden Kettenspeicher KS_{O_i} aus.

Die Abflüsse werden innerhalb eines Zeitschrittes in zwei geschachtelten Rechenschleifen berechnet. In der äußeren Schleife werden die Sub-Zeitschritte und in der inneren Schleife die Zuflüsse aller einmündenden Teilflächen und Kettenspeicher KS_{O_i} berechnet. Der Speicherinhalt von KS_U wird am Ende jedes Sub-Zeitschrittes mittels der berechneten Zuflüsse und der Abflüsse des vorangegangenen Zeitschrittes $t - 1$ vorläufig bilanziert. Nach jedem Sub-Zeitschritt s werden die Speicherinhalte aller Speicher KS_U und KS_{O_i} bilanziert und Wasserstände berechnet.

$$S_{KU(t)} = S_{KU(t-1)} + \sum_{s=1}^{s=n_s} \left(\sum_{i=1}^{i=n_i} (QZ_{U(t,s)} + QA_{SP,L(t,s)} - QA_{U(t-1,s)}) \right) \quad (\text{Gl. 4.4.3})$$

mit

$$QZ_{U(t,s)} = \sum QA_{O_i(t,s)} \quad (\text{Gl. 4.4.4})$$

$S_{KU(t)}$:	Speicherinhalt am Ende des Zeitschrittes t	[m ³]
$S_{KU(t-1)}$:	Speicherinhalt am Ende des Zeitschrittes $t-1$	[m ³]
n_s :	Anzahl der Sub-Zeitschritte	[-]
n_i :	Anzahl der Kettenspeicher oberhalb	[-]
$QZ_{U(t,s)}$:	Zufluss zu KS_U im Sub-Zeitschritt s des Zeitschrittes t	[m ³ /s]
$QA_{O_i(t,s)}$:	Abfluss des Kettenspeichers KS_{O_i} im Sub-Zeitschritt s des Zeitschrittes t	[m ³ /s]
$QA_{U(t-1)}$:	Mittlerer Abfluss des Kettenspeichers KS_U im vorangegangenen Zeitschritt $t-1$	[m ³ /s]
$QA_{SP,L(t,s)}$:	Landflächenabfluss im Sub-Zeitschritt s des Zeitschrittes t	[m ³ /s]

Die Abflüsse $QA_{O_i(t,s)}$ werden anhand der Kontinuitätsgleichung (Gl. 4.1.14) durch Iteration berechnet, bis die vorgegebene Fehlertoleranz unterschritten wird. Eine Fehlertoleranz von 2 % hat sich aufgrund von Sensitivitätsuntersuchungen als zweckmäßig herausgestellt.

Für den jeweils folgenden Sub-Zeitschritt werden anhand der berechneten Wasserstände Abflusskurven für jeden oberliegenden Kettenspeicher KS_{O_i} mittels der Fließformel nach Manning-Strickler unter Annahme quasi-stationärer Bedingungen berechnet. Das Wasserspiegelgefälle I_w berechnet

sich aus der Differenz zwischen den Wasserständen der ober- und unterliegenden Speicher, dividiert durch die mittlere Fließstrecke.

$$I_W = (W_{O(t,s)} - W_{U(t,s)}) / \Delta l_{UO} \quad (\text{Gl. 4.4.5})$$

mit

$W_{O(t,s)}$: Wasserstand des Kettenspeichers KS_{O_i} im Sub-Zeitschritt s des Zeitschrittes t [m³]

$W_{U(t,s)}$: Wasserstand des Kettenspeichers KS_U im Sub-Zeitschritt s des Zeitschrittes t [m³]

Die Anzahl der Sub-Zeitschritte n_s beträgt mindestens zwei. Sie kann erhöht werden, bis ein Sub-Zeitschritt eine Minute lang ist. Kürzere Sub-Zeitschritte werden nicht verarbeitet, weil bei eingelesenen Ganglinien Zeitintervalle kürzer als eine Minute nicht verwaltet werden können. Die Erhöhung der Anzahl von Sub-Zeitschritten kann erforderlich werden, wenn aneinander grenzende Speicher signifikant verschieden große Speicherinhalte aufweisen und die Abflussberechnung trotz Einhaltung der Courant-Bedingung zu Oszillationen der berechneten Wasserstände führt.

Da die Berechnung der vollständigen Abflusskurven in jedem Sub-Zeitschritt rechenaufwändig ist, erfolgt die Berechnung der Abflusskurve nur zwischen den minimalen und maximalen Wasserständen, die sich innerhalb des nächsten Sub-Zeitschritts einstellen können. Die untere Grenze wird durch den Wasserstand des unterhalb liegenden Kettenspeichers $W_{U(t,s)}$ gebildet. Für die Ermittlung der oberen Grenze wird zum aktuellen Speicherinhalt des oberen Kettenspeichers $S_{O_i(t,s)}$ der Zufluss während des Sub-Zeitschritts addiert und der sich einstellende Wasserstand aus der Speicherinhaltslinie interpoliert.

Der Vorteil der beschriebenen Schleifen mit den Sub-Zeitschritten besteht darin, dass die Berechnung der Zuflüsse von mehreren einmündenden Kettenspeichern sowie nicht rückgestauten Teilflächenabfluss nahezu gleichzeitig durchgeführt werden kann. Durch die Einbeziehung von Sub-Zeitschritten wird der Rechenfehler bei gleich bleibendem Zeitschritt verringert. Konstante Randbedingungen für einen Zeitschritt von z. B. 15 Minuten führten während der Entwicklungsphase des Kettenspeicheransatzes meist zu einer Überschätzung der Abflüsse innerhalb einzelner Zeitschritte und dadurch zu oszillierenden Ganglinien, wenn aneinander angrenzende Ketten-

speicher signifikant unterschiedliche Inhaltslinien aufweisen und dadurch auf Zu- und Abflüssen mit signifikant unterschiedlichen Wasserstandsänderungen reagieren.

Kettenspeicher mit einer unteren Randbedingung

Weist ein Kettenspeicher an seinem Auslass eine feste Randbedingung auf, wird der Abfluss in Hauptfließrichtung berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Höhe des Kettenspeicherabflusses keinen Einfluss auf den Wasserstand der unterhalb liegenden Teilfläche bzw. Kettenspeichers hat.

Untere Randbedingungen sind:

- vorgegebene Wasserstandsganglinien (Außenpeil),
- vorgegebene Abflusskurven,
- die in NAXOS implementierten Wasserbauwerke „Schütz“ und „Stauklappe“ (vgl. Kap. 4.5.3 und 4.5.4) (Rückstau einfluss auf den Abfluss ist in den z. T. empirischen Abflussformeln implizit enthalten),
- das in NAXOS implementierte Wasserbauwerk „Siel“ (Kap. 4.5.1) (stellt nur dann eine untere Randbedingung dar, wenn die unterhalb folgende Teilfläche kein Kettenspeicher ist; in diesem Fall muss eine Wasserstandsganglinie für das Außenpeil vorgegeben sein)

Da der Außenwasserstand maßgeblich für die Höhe des Abflusses und die Zeitpunkte des Öffnens und Schließens eines Siels ist, wird er mit der maximalen zeitlichen Auflösung des Modells von einer Minute berechnet. Die Anzahl der Sub-Zeitschritte wird so gewählt, dass die Sub-Zeitschritte eine Minute lang sind.

Wird die untere Randbedingung durch eine vorgegebene Abflusskurve definiert, kann der Abfluss nach Berechnung des Zuflusses anhand der Gl. 4.1.14 berechnet werden.

Wird keine Wasserstandsganglinie für das Außenpeil der Wasserbauwerke „Schütz“ und „Stauklappe“ vorgegeben, muss das Außenpeil simuliert werden. Wegen der Einhaltung der Abarbeitungsreihenfolge wird jedoch der Abfluss des Wasserbauwerkes vor dem aktuellen Außenpeil berechnet. In diesem Fall muss unter Berücksichtigung eines zeitlichen Fehlers von einem

Zeitschritt das Außenpeil des vorangegangenen Zeitschritts für die Simulation herangezogen werden.

Abflussberechnung entgegen der Fließrichtung

Aufgrund der programminternen Abarbeitungsreihenfolge von der Wasserscheide zum Gebietsauslaß hin und wird zunächst ausschließlich Abfluss berechnet, der in Hauptentwässerungsrichtung fließt. Ist nach Abarbeitung aller Teilflächen und Kettenspeicher am Ende eines Rechenzeitschrittes der aktuelle Wasserstand eines unteren Kettenspeichers KS_U höher als der Wasserstand eines oberhalb liegenden Kettenspeichers KS_{Oi} , wird eine Abflussberechnung entgegen der Fließrichtung durchgeführt. Die Abarbeitungsreihenfolge erfolgt entgegengesetzt zur Hauptfließrichtung und wird mit den gleichen Algorithmen wie die Abflussberechnung in Hauptfließrichtung durchgeführt.

4.5 Wasserbauwerke für den Kettenspeicheransatz

4.5.1 Siel mit Stemmtoren

Weist ein Siel einen kleineren Querschnitt als das oberstrom liegende Sieltief auf, muss die querschnittbedingt reduzierte Abflussleistung des Siels berücksichtigt werden. Als Beispiel für ein Siel ist eine Aufsicht auf das Käseburger Siel in Abb. A5 im Anhang abgebildet. Das Öffnen und Schließen der Stemmtore wird im Normalfall durch die Gezeiten geregelt, wenn der Sielvorgang nicht manuell unterbunden wird.

Der mittlere Sielzugabfluss S_z wird häufig (z. B. Zillich, 1977) mit statistischen Gleichungen wie

$$S_z = f(BThw, BTnw, Dz) \quad (Gl. 4.5.1)$$

mit

Sz:	Mittlerer Sielzugabfluss	[m ³]
BThw:	Binnentidehochwasser	[mNN]
BTnw:	Binnentideniedrigwasser	[mNN]
Dz:	Sielzugdauer	[h]

beschrieben, wobei eine Gleichartigkeit des Wasserstandsverlaufes bei allen Sielzügen vorausgesetzt wird.

Innerhalb des Sielbauwerks liegt i. d. R. ein Rechteckquerschnitt vor, das bei Sielen im Unterweserraum im Mittel ca. 35 m lang ist (Meyer, U. et al.). Nach Zillich (1977) kann davon ausgegangen werden, dass bei einem Sielzug der instationäre Term der St. Venant Gleichungen mit zunehmender Stauraumentleerung abnimmt und bei BTnw zu vernachlässigen ist. Der Abfluss kann als stationär-ungleichförmig betrachtet werden, wenn bei gut ausgebauten Sielen nach einem Anstieg des Abflusses bei Sielöffnung der Abfluss über die Sielzugdauer nahezu konstant verläuft.

Dem Modellkonzept von NAXOS liegt zugrunde, dass alle Kettenspeicher als hydrologische Speicher mit waagerechter Wasserspiegellage betrachtet werden, bei denen der Abfluss vom Wasserstand bzw. der Wasserstandsdifferenz zu angrenzenden Speichern und dem Fließquerschnitt abhängt. Die Abflusskurve aus dem Siel wird in NAXOS mit der Fließformel nach Bernoulli berechnet. Die Gleichung für die Fließgeschwindigkeit im Siel v_2 berücksichtigt die Fließgeschwindigkeit im Sieltief v_1 und die Höhendifferenz Δh_e zwischen Energielinie vor dem Siel im Vergleich zum Wasserstand am Sielauslauf:

$$v_2 = v_1^2 + 2g (\Delta h_e - h_v) . \quad (\text{Gl. 4.5.2})$$

mit

v_1 :	Fließgeschwindigkeit im Sieltief	[m/s]
v_2 :	Fließgeschwindigkeit im Siel	[m/s]
Δh_e :	Höhendifferenz zwischen Energielinie vor dem Siel im Vergleich zum Wasserstand am Sielauslauf	[m]
h_v :	Verlustrhöhe	[m]

Im Sieltief ist der Querschnitt viel größer als im Siel. Damit ist die Fließgeschwindigkeit v_1 im Sieltief gering im Verhältnis zur Fließgeschwindigkeit v_2 , und v_1 wird bei Näherungsverfahren zur Sielabflussberechnung oft vernachlässigt (Kunz, 1975). Dadurch vereinfacht sich die Gl. 4.5.2 zu

$$v_2 = (2g (\Delta h_e - h_v))^{1/2} . \quad (\text{Gl. 4.5.3})$$

Die Verlusthöhe h_v kann durch einen dimensionslosen Beiwert μ abgeschätzt werden, so dass die mittlere Geschwindigkeit im Siel und der Abfluss zu

$$v_m = \mu (2g \Delta h_e)^{1/2} \quad \text{und}$$

$$Q = v_m b h_2 \quad (\text{Gl. 4.5.4})$$

mit

μ : Dimensionsloser Beiwert [-]

berechnet werden kann. Der Wert μ wurde durch Abflussmessungen an mehreren Sielen zwischen 0,43 und 0,5 berechnet. Die durch die Vereinfachung der Gleichungen zu erwartenden Differenz zwischen Messung und Rechnung schätzt Kunz zu 5 %.

Der instationäre Abflussvorgang beim Sielen wird durch Unterteilung jedes Rechenschrittes in Sub-Zeitschritte von einer Minute als quasi-stationärer Abfluss berechnet. In jedem Sub-Zeitschritt wird mittels des berechneten Binnen- und des aus Messwerten interpolierten Außenwasserstandes eine neue Abflusskurve nach der Gl. 4.5.4. berechnet.

NAXOS berechnet automatische Öffnung des Siels, wenn das Außenpeil über einen Zeitraum von mindestens drei Minuten geringer als Binnenpeil plus Öffnungsdifferenz h_0 ist. Es schließt, nachdem der Außenpeil über mindestens drei Minuten höher als das berechnete Binnenpeil plus Öffnungsdifferenz ist. Die Öffnungsdifferenz wird als Modellparameter vorgegeben und kann bis zu 20 cm betragen. Das Öffnen des Siels kann zusätzlich durch eine Zeitreihe mit Steueranweisungen für vorgegebene Zeiträume unterbunden werden.

Beim Öffnen und Schließen des Siels wird die Sielbreite b in Gl. 4.5.4 über einen Zeitraum von pauschal sechs Minuten (sechs Sub-Zeitschritte) linear zwischen Null und voller Sielbreite interpoliert, um das langsame Öffnen und Schließen der Stemmtorpaare nachzubilden.

4.5.2 Mündungsschöpfwerk

Die Simulation des Abflusses an Sielen kann durch Mündungsschöpfwerke ergänzt werden. Für den Schöpfwerksbetrieb werden in NAXOS folgenden Bedingungen angenommen:

- Die Förderleistung eines Schöpfwerks ist von der geodätischen Förderhöhe h_g (Differenz zwischen Binnen- und Außenpeil) unabhängig.
- Vom Binnenpeil am Betriebspegel abhängige Förderleistungen können vorgegeben werden.
- Der Betriebspegel kann in einer beliebigen Teilfläche angeordnet sein.
- Die Förderleistung ist über einen Rechenzeitschritt konstant.
- Es wird nicht gleichzeitig Sielen und Schöpfen simuliert. Wird im aktuellen Zeitschritt kein Sielabfluss berechnet und das Siel ist nicht durch eine manuelle Steueranweisung geschlossen, kann das Modell Schöpfwerksbetrieb simulieren.
- Das Schöpfwerk fördert auch bei Unterschreitung des (oberen) Grenzwasserstandes am Betriebspegel weiter, wenn ein unterer Grenzwasserstand vorgegeben ist.
- Der geschöpfte Abfluss kann optional in eine andere Teilfläche als die Folgeteilfläche umgeleitet werden (s. Schöpfwerk Kuhsiel, Kap. 5.2.1).

4.5.3 Schütz

Die Steuerung eines Schützes ist von den Gegebenheiten des Einzugsgebietes abhängig und muss für den konkreten Anwendungsfall angepasst werden. Es folgt eine Beschreibung der Steuerungsregeln für das Schütz Wasserhorst, das den Auslass des Maschinenfleets im Einzugsgebiet der Lesum bildet. Das Modell NAXOS wird auf das Einzugsgebiet der Lesum angewendet (s. Kap. 5.2).

Die Steuerung der Hubtore im Modell erfolgt nach den Verfahren, mit denen das Schütz durch den Bremischen Deichband a. r. W. betrieben wird. Die Stellung der beiden getrennt steuerbaren Hubtore wird am oberstrom gelegenen Betriebspegel Walle durch einen Zentralrechner vorgegeben. Anhand des Wasserstandes am Betriebspegel und der Differenz zwischen Binnen- und Außenpeil wird die notwendige Öffnung (Klappenstellung links und rechts, voraussichtliche Dauer der Öffnung) einer empirisch aufgestellten Stellungstabelle entnommen (Tab. 4.5.1). Die zugehörigen Klappen-

stellungen sind im Anhang in Abb. A1 enthalten. Die Stellungstabelle wird von NAXOS als Modellparameter eingelesen. Eine pauschale Absenkung der Sollwasserstände am Betriebspegel kann für den Winterbetrieb vorgegeben werden.

Tab. 4.5.1 Sielstellungen für das rechte (r) und linke (l) Schütz

(Auszug aus der gesamten Tabelle); BP=Binnenpeil [m+NN],
dH=Höhendifferenz zw. Binnen- und Außenpeil [cm]; die Spalten-
überschriften 500 - 3000 stellen die zu sielende Menge [m³] während
des nächsten Sielzugs dar

BP	dH / Menge	500	1000	1500	2000	2500	3000
20	5	-	r1	r1	r1	r1/l5	r2
20	10	-	-	r1	r1	r1	r1/l5
20	15	-	-	r1	r1	r1	r1
20	20	-	-	-	r1	r1	r1
20	25	-	-	-	r1	r1	r1
20	30	-	-	-	r1	r1	r1
20	35	-	-	-	r1	r1	r1
20	40	-	-	-	-	r1	r1
20	45	-	-	-	-	r1	r1
20	50	-	-	-	-	r1	r1

Für das Maschinenfleet wird näherungsweise angenommen, dass jeder Zentimeter Binnenpeil am Pegel Walle, der über dem einzuhaltenden Wasserstand liegt, einem Wasservolumen von jeweils ca. 7 000 m³ entspricht. Dieses Volumen kann i. d. R. bei der anzuhaltenden Klappenstellung gesielt werden. Unregelmäßige, manuelle Eingriffe in die Hubtorregelung lassen sich bei der Simulation mit dem Flussgebietsmodell naturgemäß nicht nachbilden.

Da ein Schütz als Teil eines Kettenspeichers simuliert wird, erfolgt vor der Abflussberechnung die Berechnung des Zuflusses von oberhalb liegenden Kettenspeichern. Das Außenpeil des Schützes kann durch eine Wasserstandsganglinie vorgegeben (Fall a) oder von NAXOS anhand eines in Fließrichtung folgenden Kettenspeichers berechnet (Fall b) werden. Der Abfluss des Schützes wird während der Abarbeitung der Teilfläche bzw. des Kettenspeichers („in Fließrichtung“) berechnet. Die Länge der Sub-Zeitschritte beträgt pauschal eine Minute. Bei Fall (a) wird die Wasserstandsganglinie für jeden Sub-Zeitschritt interpoliert. Bei Fall (b) ist aufgrund der

Abarbeitungsreihenfolge der Wasserstand unterhalb des Schützes im aktuellen Zeitschritt noch nicht berechnet, so dass mit einem Fehler von einem Rechenzeitschritt der Außenwasserstand des vorangegangenen Zeitschrittes verwendet werden muss.

Die Torstellung wird in NAXOS für jeden Rechenzeitschritt analog dem oben beschriebenen Verfahren aus der Stellungstabelle bestimmt. Eine aus der Tabelle 4.5.1 berechnete Stellung der Hubtore wird für 15 Minuten Beharrungszeit beibehalten, bevor eine Änderung der Torstellung simuliert wird.

Durch Fallunterscheidung nach der Bauwerksgeometrie und der Höhe von Binnen- und Außenpeil wird anhand der Fließformeln für den vollkommenen und unvollkommenen Überfall (Abb. A6 im Anhang) eine Abflusskurve für jeden Zeitschritt erstellt. Die Abflussberechnung wird mittels des Seeretenionsverfahrens für alle Sub-Zeitschritt durchgeführt und der Gesamtabfluss eines Zeitschrittes über alle Sub-Zeitschritte gemittelt.

4.5.4 Stauklappe

Die Stauklappe mit fünf verschiedenen Klappenstellungen wurde für den Auslass des Kuhsiels am Geerkenstau im FGM Lesum implementiert. Die Klappenstellungen werden in Abhängigkeit von Regelwasserständen eines Betriebspegels eingestellt. Mittels der Stauklappenbreite b , des Überfallbeiwerts μ und der Wasserstandsdifferenz zwischen Binnenpeil und Stauklappenoberkante h_0 wird in jedem Zeitschritt eine Klappenstellung ausgewählt und der Abfluss nach der Formel für vollkommenen Überfall berechnet zu:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} h_0^{1,5} . \quad (4.5.5)$$

mit

h_0 : Überfallhöhe [m]

Der Überfallwert μ wird mit 0,65 für umgelegte Stauklappen angesetzt (Schneider, 1994). Da die Stauklappe in der Praxis nicht mit jedem Rechenzeitschritt neu justiert werden kann, ist die Vorgabe einer Beharrungszeit möglich, innerhalb der die Klappenstellung nicht verändert

wird. Eine Absenkung der Sollwasserstände am Betriebspegel kann für den Winterbetrieb vorgegeben werden.

5 Modellanwendung

Der Kettenspeicheransatz und seine Implementierung im N-A-Modell NAXOS sollen im Folgenden auf zwei Flussgebiete mit verschiedenen Sieltypen angewendet werden. Im Käseburger Sieltief wird der Binnenwasserstand durch ein Siel mit Stemmtoren und Schöpfwerk geregelt. Im Einzugsgebiet der Lesum sollen die zwei Sieleinzugsgebiete Kuhsiel und Wasserhorst näher untersucht werden. Die Lage der Untersuchungsgebiete an der Unterweser veranschaulicht Abb. 5.1.

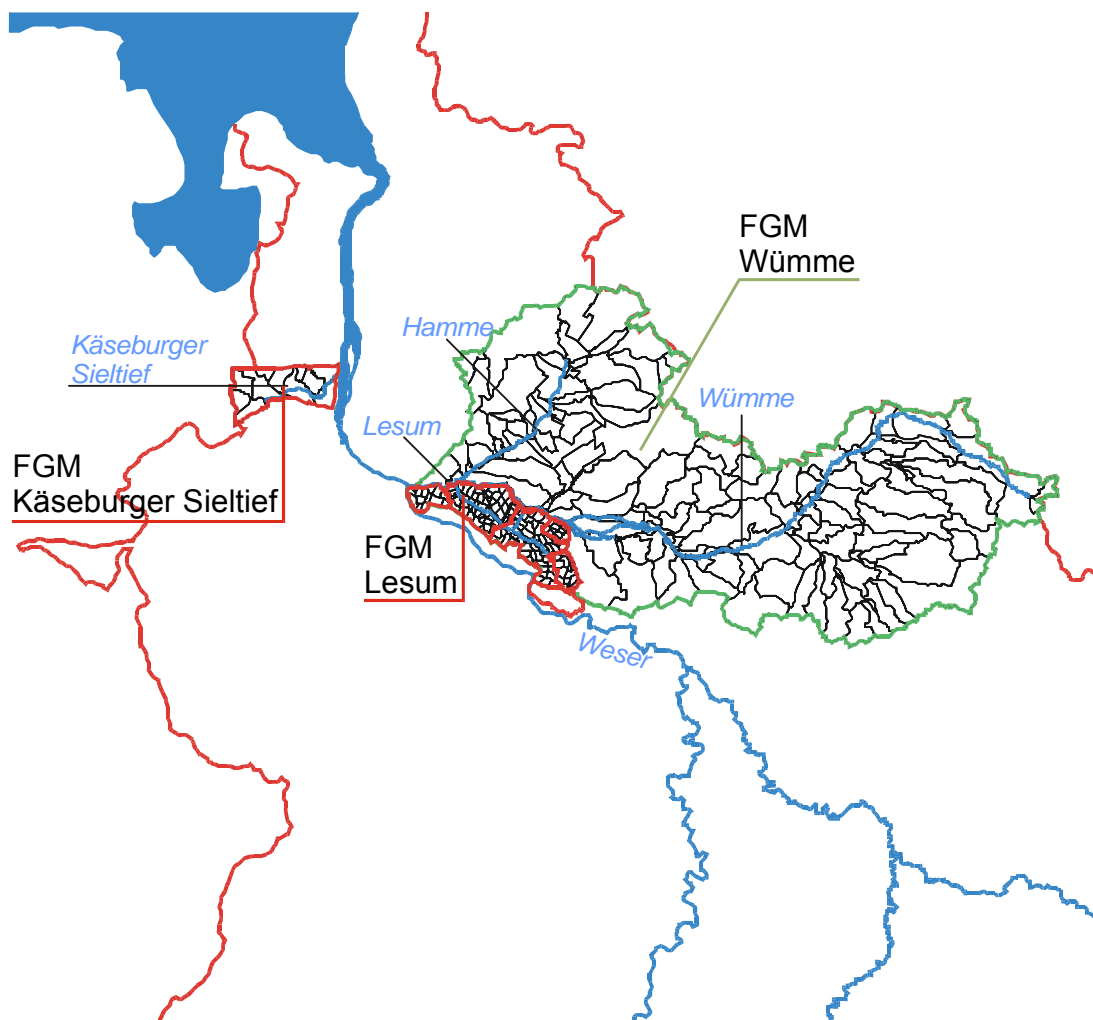


Abb. 5.1 Übersicht über die Lage der Untersuchungsgebiete Käseburger Sieltief und Lesum an der unteren Weser

5.1 Flussgebietsmodell Käseburger Sieltief

5.1.1 Aufbau des Flussgebietsmodells

Das Käseburger Sieltief liegt in der Wesermarsch und umfasst ein Einzugsgebiet von ca. 72 km². Es erstreckt sich westlich der Weser bis fast an den Geestrand. Als holozäne Deckschicht stehen in der Niederung vor der Geest verschiedene Moore an. In Richtung Weser wird das Holozän von Moor-Marsch- und Marsch-Böden gebildet. Das Einzugsgebiet steht mit der Geest in Verbindung (Kunz, 1975) und wird künstlich über Gräben und ein Hauptsieltief mit Siel und Schöpfwerk entwässert. Das Flussgebietsmodell Käseburger Sieltief ist ein Ausschnitt eines Flussgebietsmodells für die Unterweser. Für eine detaillierte Beschreibung der weiteren Eingangsdaten Topografie, Landnutzung, Boden usw. wird auf Maniak et al. (2000) verwiesen. Abb. 5.1.1 zeigt die Teilflächen mit jeweils einem Hauptgerinne und der Hauptfließrichtung bis zur Weser.

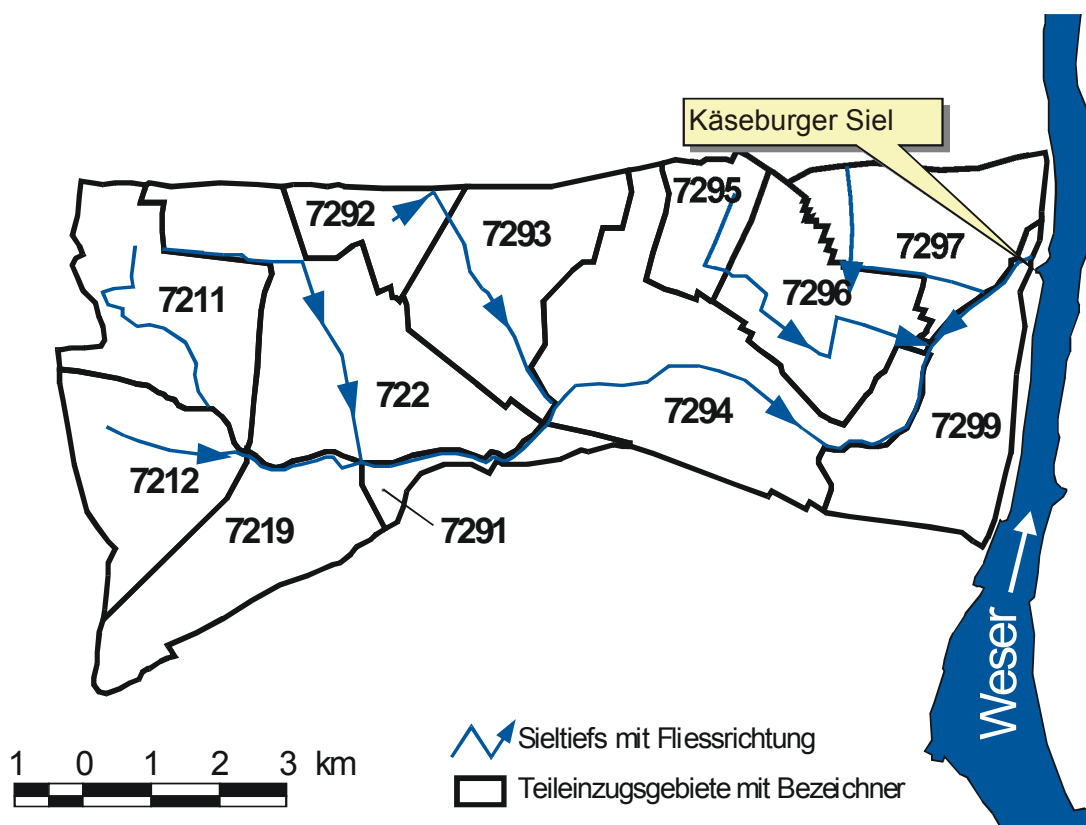


Abb. 5.1.1 Teilflächenplan, Hauptsieltief und Entwässerungsrichtung im Flussgebietsmodell Käseburger Sieltief

Das gedeckte Siel (Abb. A5 im Anhang) hat einen Sielverschluss aus zwei Stemmtorpaaren. Als zweite Sicherung dienen hinter den Stemmtorpaaren angeordnete Hubtore. Die Abmessungen des Durchlasses weisen eine Breite von 2 x 5,10 m bei einer Höhe von 3,30 m auf. Die Sohle des Sielbauwerks (Drempelhöhe) liegt bei -2,90 mNN. Das Mündungsschöpfwerk besteht aus zwei Propellerpumpen mit Schaufelverstellung (Motorleistung 2 x 300 kW) und hat eine Förderleistung von jeweils 6,50 m³/s bei einer maximalen Förderhöhe von 3,10 m.

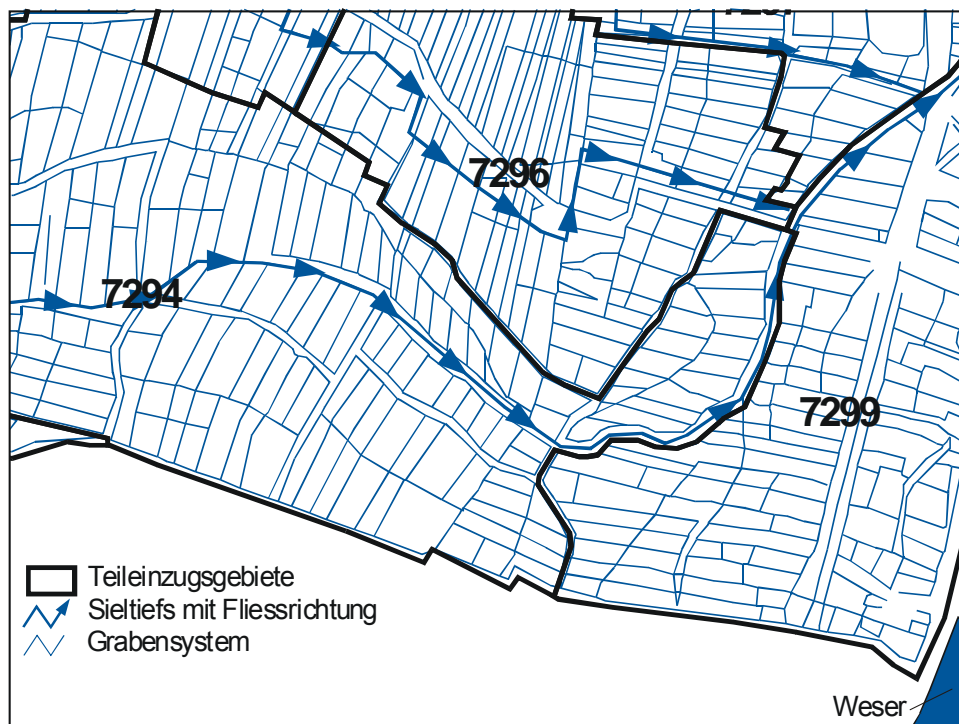


Abb. 5.1.2 Ausschnitt aus dem Grabensystem im Käseburger Sieltief

Für das Käseburger Sieltief wurden alle Gräben anhand der Hydrographischen Karte Niedersachsen (1:50 000) digitalisiert und gemäß der Breite der Linien in der Karte in drei Grabenkategorien untergliedert. Dünne Gewässerlinien in der Karte entsprechen Kategorie 3, fett gezeichnete Gewässerlinien entsprechen Kategorie 2 und Fließgewässer mit flächiger Füllung werden in die Kategorie 1 eingestuft. Einen Ausschnitt aus dem Grabensystem zeigt Abb. 5.1.2. Die drei Ausgangs-Teilflächen mit den Nummern 496.721, 496.722 und 496.729 der Hydrographischen Karte wurden anhand des Verlaufs der Gräben der Kategorie 2 in die in Abb. 5.1.1 dargestellten zwölf Teilflächen untergliedert.

Tab. 5.1.1 Summen der Grabenlängen je Kategorie des digitalisierten Grabensystems in den Teilflächen nach der Hydrographischen Karte Niedersachsen

Teilfläche	Summe der Grabenlängen [m]		
	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3
496.721	0	13 000	175 000
496.722	0	5 500	99 500
496.729	12 000	18 500	400 000

5.1.2 Simulationen

Für die Simulation der Abflüsse mit NAXOS wurde der Zeitraum von Januar bis Oktober 1991 ausgewählt, für den tägliche Niederschlagssummen der Stationen Brake und Ovelgönne, Stützstellen der Binnenwasserstände am Käseburger Siel, die Weserwasserstände am 2 km weserabwärts gelegenen Braker Siel sowie der mittlere Abfluss je Sielzug ohne Datenlücken vorlagen. Die beobachteten Wasserstände geben die Tidehoch- und Niedrigwasserstände wieder, so dass im Mittel je Tidezyklus (rund 12,5 Stunden) zwei Messwerte vorliegen.

Die Abflussmenge je Sielzug für das Jahr 1991 wurde nach einem statistischen Ansatz von der Bezirksregierung Weser-Ems, Außenstelle Brake, nach Gl. 5.1.1 abgeschätzt. Mit der im Folgenden als *Sielformel* bezeichneten Regression, die für freie Sielentwässerung gilt, wird die Sielzugmenge S_z für jeweils ein Siel berechnet:

$$S_z = 7,08 \cdot h_z \cdot h_m \quad (\text{Gl. 5.1.1})$$

mit:

S_z : Sielzugmenge je Siel [m³]

h_z = BThw - BTnw (Sielzugfall) [m]

h_m = BThw - $h_z/2$ - 2,10 (mittlerer Wasserstand über Drenpelhöhe) [mNN]

BThw: Binnentidehochwasser [mNN]

BTnw: Binnentideniedrigwasser [mNN]

Zur Ermittlung des mittleren Wasserstandes h_m beim Sielzug muss am Käseburger Siel von den aufgezeichneten Binnenwasserständen BThw und BTnw die Höhe des Pegelnullpunkts +5,00 mNN und die Drenpelhöhe des Sieles

2,90 mNN subtrahiert werden. Daraus ergibt sich der Wert von 2,10 m in Gl. 5.1.1. Die Abweichungen der berechneten von gemessenen Abflüssen betragen nach Kunz (1975) $\pm 5\%$. Für die Zuwässerung sowie für abgebrochene oder gedrosselte Sielzüge wird die Gl. 5.1.1 ebenfalls verwendet. Aufgrund der Steuerung mit dem Hubtor sind die Wassermengen bei Zuwässerung schwerer zu erfassen; die Abweichung liegt nach Kunz (1975) bei $\pm 20\%$.

Die optimale Anpassung zwischen beobachteten bzw. berechneten und mit NAXOS simulierten Werten wird bei der Kalibrierung visuell beurteilt. Zusätzlich werden bei der Kalibrierung die Abweichungsparameter für Abfluss- und Wasserstand berücksichtigt (vgl. Kap. 2.4).

Mit dem vom Verfasser erweiterten SCS-Verfahren (Kap. 2.5.1) wird die Aufteilung der Abflusskomponenten in Abhängigkeit von der bilanzierten Bodenfeuchte durchgeführt. Niederschläge, Landflächenabflüsse und die aktuelle Evapotranspiration gehen in die Bodenfeuchtebilanzierung mit ein. Anhand der Wasserbilanz über den Simulationszeitraum von neun Monaten wurde eine mittlere jährliche Evapotranspiration von 450 mm ermittelt und als Modellparameter angesetzt. Dies liegt im Rahmen des langjährigen Mittels im Unterweserraum zwischen 420 und 550 mm (Niedersächsischer Umweltminister, 1990, 1994). Die Modellparameter Anfangsbodenfeuchte, Speicherkonstanten und Anfangs-Basisabflussspende werden bei der Kalibrierung, da kein kontinuierlicher Abfluss am Siel vorliegt, anhand der gesielten Abflüsse und bei geschlossenem Siel durch den Wasserstandsanstieg abgeschätzt. Die kalibrierten Modellparameter für Abflussbildung und -konzentration sind in Tab. 5.1.2 aufgeführt.

Tab. 5.1.2 Modellparameter für das Käseburger Sieltief

Teilprozess	Modellparameter	Käseburger Sieltief
Abflussbildung	Aufteilungsparameter anto [-]	0,5
	Anfangsbodenfeuchte bofeu [mm]	0
Abflusskonzentration	Speicherkonstanten-Faktoren [-]:	
	Oberflächenabfluss	1
	Interflow	80
	Grundwasserabfluss	5 000
Basisabfluss	Basisabflussspende [l/s km²]	5
Wellenverformung durch Kettenspeicher	Anfangsbinnenwasserstand [mNN]	0,0

Der Meliorationswasserstand innerhalb des Käseburger Sieltiefs liegt im Sommer zwischen ± 0 mNN und -1.5 mNN. Er wird im Winter abgesenkt. Bei zu niedrigen Binnenwasserständen wird der Sielzug häufig verkürzt oder unterbunden. Im Sommer wird bei Wasserbedarf zugewässert. Im Fall der Zuwässerung wird bei der Simulation angenommen, dass die gesamte zugewässerte Wassermenge wieder über das Entwässerungssystem abgeführt wird; die Verluste infolge Verdunstung und Versickerung betragen nach Kunz (1975) lediglich ca. 10 %. Die am Siel gemessenen Binnenwasserstände hatten im Untersuchungszeitraum zwischen Januar und Oktober 1991 eine mittlere Höhe von ca. -1,5 mNN, die zwischen Januar und März 1991 häufiger bis auf -1,90 mNN abgesenkt wurde. Für das Sommerhalbjahr zwischen 15.03. und 01.10.1991 wird für die Simulation ein mittlerer Meliorationswasserstand von -1,4 mNN vorgegeben, der im Winterhalbjahr um 0,35 m abgesenkt wird. Im Untersuchungszeitraum liegt der höchste Binnenwasserstand bei 0,0 mNN, der niedrigste bei -2,04 mNN. Der mittlere Sielzugfall beträgt 30 cm.

Im Kalenderjahr 1991 waren folgende Entwässerungszustände zu verzeichnen: Bei 31,5 % der Tideniedrigwasser erfolgten normale Sielzüge, bei 0,7 % war ein Sielzug aufgrund zu hoher Außenwasserstände nicht möglich, bei 62 % wurde der Sielzug verhindert (z. B. Markierung 1 in Abb. 5.1.3) und bei 6 % der Tideniedrigwasser wurde der Sielzug gedrosselt. Geschöpfte Abflüsse wurden mit NAXOS nicht simuliert, da 1991 nur 2 % der Abflüsse geschöpft wurden (Maniak et al., 2000). Die Zeitpunkte, an denen der Sielzug verhindert wird, legt der Sielbetreiber fest. Sie können nicht mit Betriebsregeln simuliert werden. Zur Nachbildung dieser Einstauphasen wird

für die Simulation mit NAXOS eine Ganglinie mit aufgezeichneten Schließanweisungen vorgegeben. Aufgezeichnete Zuwässerungen werden als Seitenwelle berücksichtigt (s. Abb. 5.1.6). Die Wasserstände im Oberlauf des Sieltiefs wurden nicht gemessen.

Der Anfangsbinnenwasserstand am Gebietsauslass stellt einen sensitiven Parameter dar, wenn von diesem auf die Wasserstände im gesamten Einzugsgebiet geschlossen wird. Bei Vorgabe eines Anfangsbinnenwasserstandes am Auslass von -0,75 mNN am 01.01.1991 wird ein Anfangsinhalt aller Kettenspeicher von 4 329 140 m³ berechnet. Bei einem Anfangsbinnenwasserstand von -0,85 mNN beträgt der Anfangsinhalt 4 777 170 m³. Die Differenz von 10 cm Anfangswasserstand verändert bei gleichem Wasserstand am Ende der Berechnung nach 9 Monaten den simulierten Abflussbeiwert um das Äquivalent von 8 mm Niederschlag.

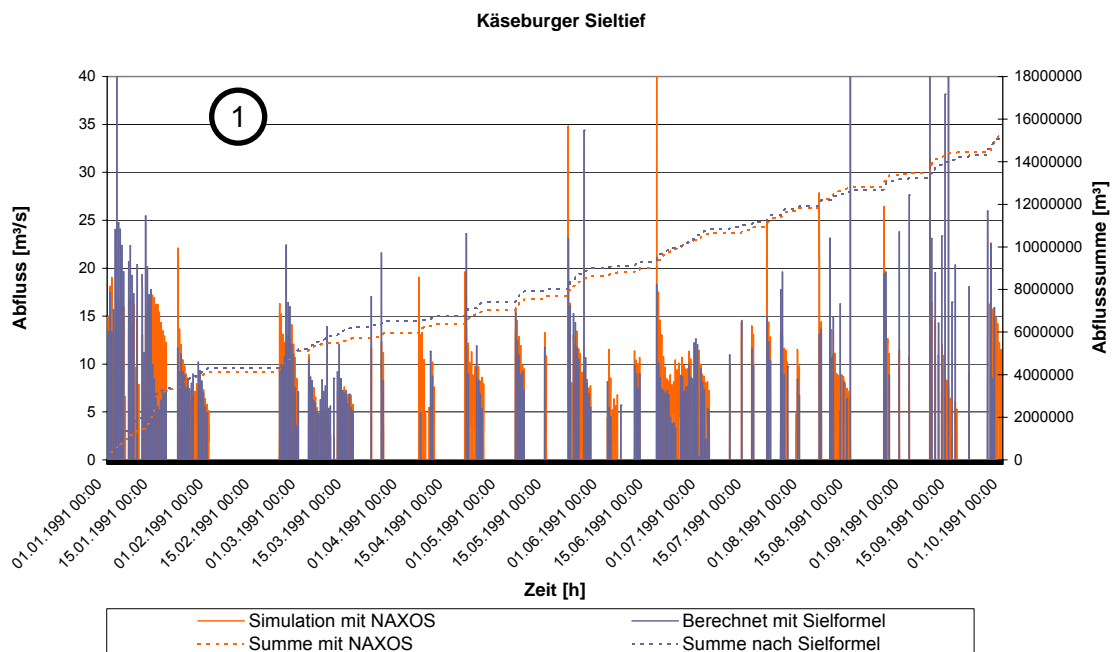


Abb. 5.1.3 Mit Sielformel berechnete und mit NAXOS simulierte Abflüsse und Abflusssumme am Käseburger Siel (Januar - Oktober 1991)

Die in Abb. 5.1.3 dargestellten Abflüsse und Abflusssummen zeigen, dass die mit der Sielformel berechneten und die mit NAXOS simulierten Abflüsse im gesamten Untersuchungszeitraum in der gleichen Größenordnung liegen. Der Wasserhaushalt wird mit dem modifizierten SCS-Verfahren gut nachgebildet. Die Meliorationswasserstände, die als Modellparameter für jeweils

Sommer- unter Winterhalbjahr als konstant vorgegeben wurden, weichen in der Praxis wegen unregelmäßiger Eingriffe häufig von den mittleren Sollwerten ab. Dies führt zu Abweichungen zwischen berechneten und simulierten Abflüssen. Die in Abb. 5.1.3 erkennbaren Abweichungen sind außerdem auf Ungenauigkeiten beim Gebietsniederschlag und auf Differenzen zwischen der von NAXOS berechneten und der tatsächlichen aktuellen Evapotranspiration zurückzuführen, die nicht genau quantifiziert werden können.

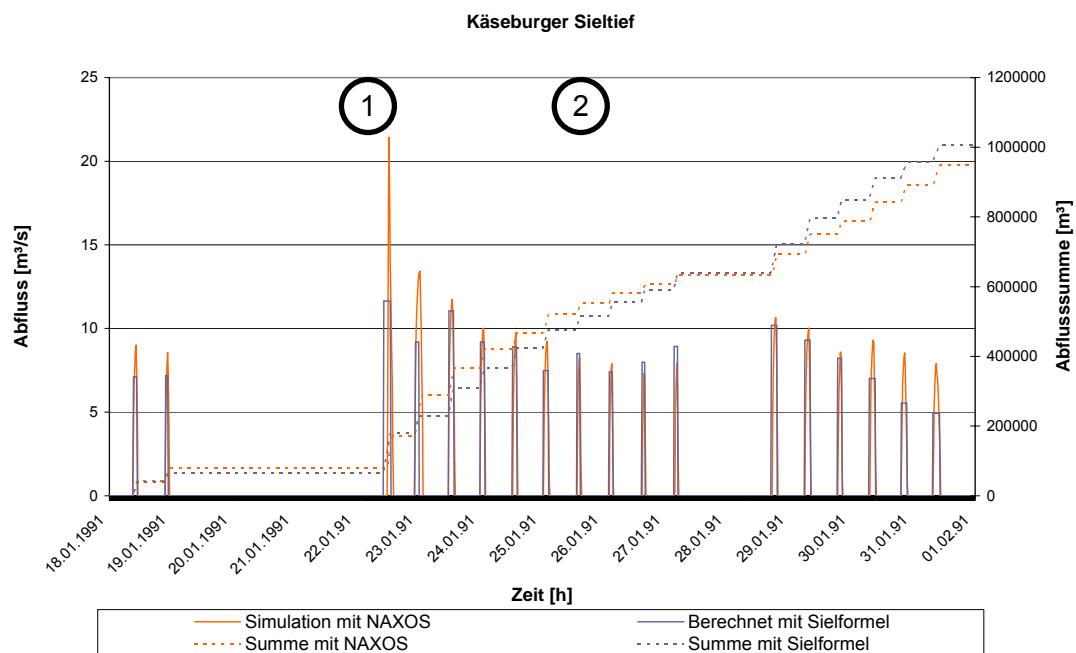


Abb. 5.1.4 Mit Sielformel berechnete mittlere Sielzugabflüsse und von NAXOS simulierte Abflüsse und Abflusssummen über 14 Tage am Käseburger Siel (18.01. bis 01.02.1991)

Da der gesielte Abfluss nicht kontinuierlich erfolgt, müssen nach Niederschlagsereignissen für eine Verifizierung der simulierten Landflächenabflüsse die Abfluss- und die Wasserstandsganglinie bewertet werden. In der empirischen Sielformel (Gl. 5.1.1) ist der über mehrere Jahre gemittelte Zufluss zum Sieltief von den Landflächen und einmündenden Gräben berücksichtigt. Bei überdurchschnittlichen Zuflüssen zum Sieltief (z. B. durch Starkregen) wird der gesielte Abfluss durch die Sielformel zu niedrig und bei unterdurchschnittlichen Zuflüssen zu hoch berechnet.

Beispielhaft zeigt Abb. 5.1.4 einen Ausschnitt von 14 Tagen mit einer dreitägigen Phase unterbundener Sielzüge. In den 14 Tagen fällt auch Niederschlag. Die simulierten und die berechneten Sielabflüsse stimmen nahezu überein, die simulierte Abflusssumme weicht um nur ca. 5 % von der berechneten Abflusssumme ab. Vom Beginn des dargestellten Ausschnittes bis zum 22.01.1991 (Markierung 1 in Abb. 5.1.5) sind die simulierten Wasserstände um ca. 20 cm - 25 cm zu hoch. Dies ist auf eine Überschätzung der simulierten Landflächenabflüsse infolge 43 mm Niederschlag zwischen 01.01. und 18.01.1991 zurückzuführen. Zwischen 21.01. und 01.02.1991 fällt kein weiterer Niederschlag. Nach drei Tagen unterbundener Sielzüge vom 19.01. bis 22.01.1991 sind die simulierten Sielzugabflüsse bis zum 25.01. infolge des vorher zu hohen simulierten Binnenpeils und der vorangegangenen Niederschläge höher als die berechneten (Markierung 1 in Abb. 5.1.4). Ab dem 25.01.1991 (Markierung 2 in Abb. 5.1.4 und 5.1.5) gleichen die simulierten Wasserstände mit geringen Abweichungen von unter 10 cm den beobachteten Wasserständen. Die simulierten Abflüsse sind ca. 20 % niedriger als die nach der Sielformel berechneten.

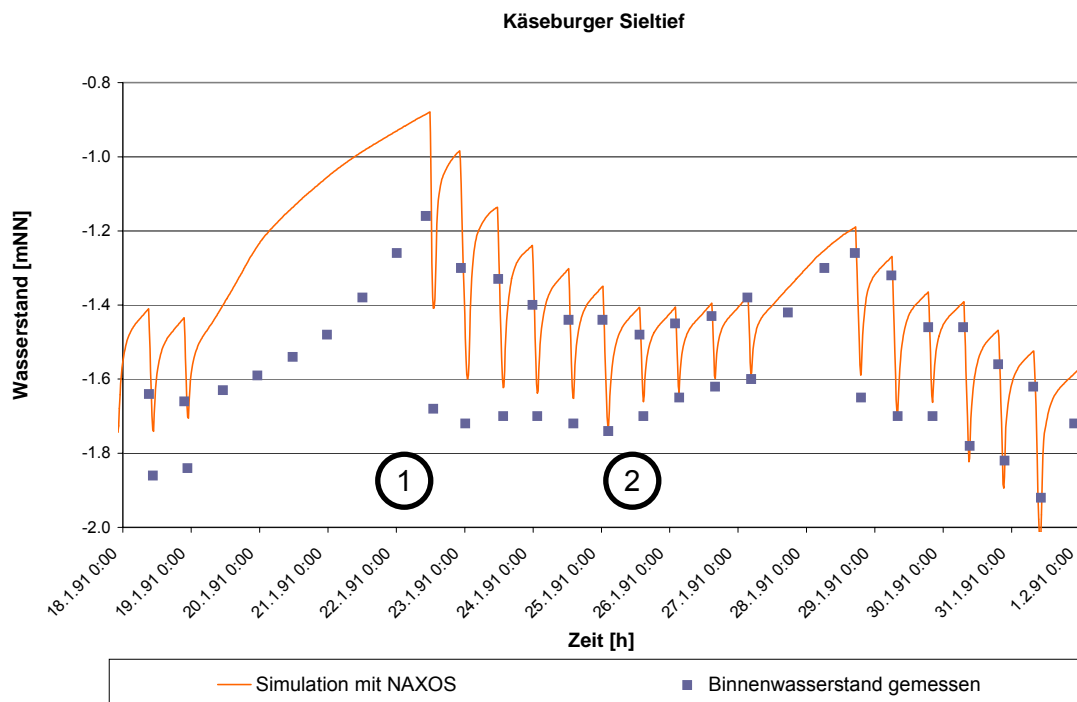


Abb. 5.1.5 Mit NAXOS simulierte und beobachtete Wasserstände über 14 Tage am Käseburger Siel (18.01. bis 01.02.1991)

Da die Sielformel vom Mittel abweichende Zuflüsse zum Sieltief nicht berücksichtigt, kann angenommen werden, dass die mit NAXOS simulierten Abflüsse die tatsächlichen Abflüsse genauer wiedergeben, wenn die simulierten mit den beobachteten Binnenwasserständen übereinstimmen.

Zwischen simulierten und beobachteten Binnenwasserständen (Abb. 5.1.6) beträgt der Korrelationskoeffizient $r = 0,956$ und belegt eine gute Übereinstimmung. Die von NAXOS simulierten Wasserstände zeichnen den Gang der beobachteten Wasserstände gut nach. Bei unterbundenen Sielzügen führen Abweichungen zwischen simuliertem und tatsächlichem Landflächenabfluss zu Binnenwasserständen, die von den Beobachtungen abweichen. Die Abweichungen vergrößern sich mit zunehmender Einstaudauer. Im Zeitraum zwischen 01.02. und 22.02.1991 (Markierung 1 in Abb. 5.1.6) liegen keine berechneten Abflüsse vor, die Ursache für den flachen Wasserstandsanstieg ist nicht bekannt. Die ansteigenden Wasserstände, die auf unterbundene Sielzüge zurückzuführen sind, können mit maximalen Abweichungen von unter 15 cm simuliert werden. Zuwässerungen fallen in der Wasserstandsganglinie deutlich auf, da der Binnenwasserstand innerhalb weniger Stunden um ca. einen Meter ansteigt (z. B. Markierungen 2 und 3 in Abb. 5.1.6). Bei Markierung 2 liegt offensichtlich Zuwässerung vor, die jedoch nicht in den vorliegenden Aufzeichnungen enthalten ist.

Bei Markierung 4 liegt ab etwa 01.09.1991 das Binnenpeil bei ca. -1,0 mNN, die simulierten Wasserstände sind am 14.09.1991 um bis zu 0,8 m tiefer. Dieser hohe beobachtete Binnenpeil kann nicht durch Niederschläge erklärt werden, da zwischen 01.09. und 20.09.1991 nur 19,8 mm Regen gefallen sind. Es ist hier von manuellen Eingriffen in die Wasserstandsregelung auszugehen, die mit dem Modell nicht nachgebildet werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit dem Modell NAXOS und dem Kettenspeicheransatz Abflüsse und beobachtete Wasserstände gut nachgebildet werden können. Die Parametrisierung der Speicherräume mit den Regelprofilen und dem digitalen Höhenmodell führt zu guten Ergebnissen. Der mittlere Sielzugfall und die Anstiege des Binnenpeils bei Zuwässerung werden mit geringen Abweichungen von wenigen Zentimetern simuliert. Die hohe Übereinstimmung zwischen simulierter und berechneter Abflusssummenlinie zeigt, dass der Wasserhaushalt über mehrere Monate mit dem verwendeten Abflussbildungsansatz gut nachgebildet werden kann.

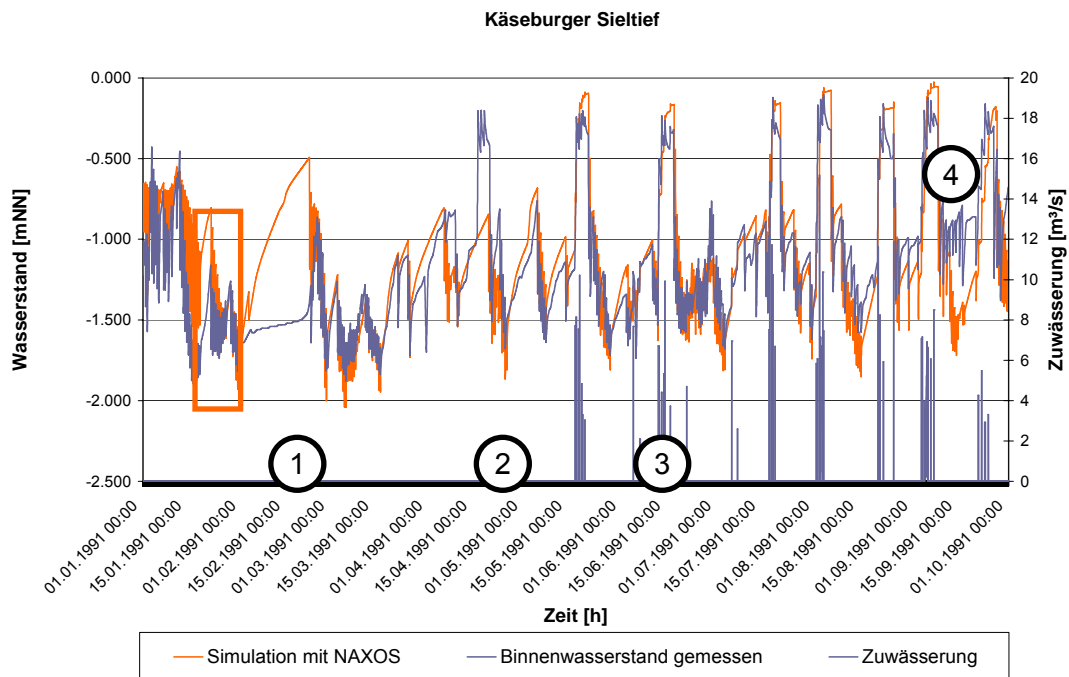


Abb. 5.1.6 Mit NAXOS simulierte und beobachtete Binnenwasserstände und Zuwässerung am Käseburger Siel (Januar - Oktober 1991)

Der rote Rahmen markiert den in Abb. 5.1.4 und 5.1.5 dargestellten Ausschnitt

Wenn simulierter und beobachteter Binnenwasserstand übereinstimmen, werden mit NAXOS auch die mittleren Sielzugabflüsse nachgebildet. Bei fehlerhaft erfassten Gebietsniederschlägen und damit fehlerhaften Abflüssen treten Wasserstandsabweichungen auf. Diese klingen jedoch meist nach wenigen Sielzügen wieder abklingen, wonach die simulierten Abflusssummenlinien wieder mit den berechneten übereinstimmen. Dies gilt nicht, wenn die tatsächlichen Betriebsregeln von den mittleren Betriebsregeln abweichen, die als Modellparameter für die Simulation mit NAXOS vorgegeben sind.

5.2 Flussgebietsmodell Lesum

Für das Einzugsgebiet der Lesum und die Zuflüsse Hamme und Wümme mit insgesamt ca. 2 200 km² wurde ein Flussgebietsmodell erstellt (s. Abb. 5.1). Das engere Untersuchungsgebiet umfasst das Verbandsgebiet des Bremischen Deichbandes am rechten Weserufer (a. r. W.) mit einer Fläche von 148 km², das nordöstlich von Bremen zwischen den Deichen von Weser, Lesum und Wümme liegt. Das Verbandsgebiet entwässert in die Lesum und wird im Folgenden als FGM Lesum (der weiter nördlich liegende Teil als FGM Wümme) bezeichnet werden. Die Wasserstände in der Wümme und in der Lesum bilden das Außenpeil für die Siele und Schöpfwerke des Verbandsgebietes. Für das Gesamtmodell Lesum werden das FGM Lesum und das FGM Wümme gemeinsam simuliert. Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich der Schwerpunkt der Untersuchung innerhalb des Verbandsgebietes auf zwei Sieleinzugsgebiete, die in die Lesum entwässern. Für die Lesum liegen aufgezeichnete Wasserstände vor, so dass das FGM Wümme hier nicht näher behandelt wird.

5.2.1 Aufbau des Flussgebietsmodells

Die Einteilung des Verbandsgebietes ist durch Siele und Schöpfwerke in die sechs Sieleinzugsgebiete Vierstückensiel, Wasserhorst, Kuhsiel, Katrepel, Osterholz und Hemelingen (Tab. 5.2.1, Abb. 5.2.1) gegeben.

Tab. 5.2.1 Flächennummer, Gebietsgrößen, Entwässerungsrichtung und Schöpfwerksleistung der Sieleinzugsgebiete im FGM Lesum

Sieleinzugs- gebiet	Flächennum- mer Auslass	Gebietsgröße in km ²	Entwässert in	Schöpfwerks- leistung
Vierstückensiel	10000	14,972	Lesum	k.A.
Wasserhorst	20000	45,225	Lesum	4 x 3,5 m ³ /s
Kuhsiel	30000	50,373	Wasserhorst	2 x 2,2 m ³ /s
Katrepel	40000	7,525	Wümme	2 x 0,5 m ³ /s
Osterholz	50000	13,358	Wümme	3 x 1,0 m ³ /s
Hemelingen	60000	17,080	Weser	2 x 0,575 m ³ /s 2 x 1,5 m ³ /s
Summe (o. Hemelingen)		148,533 (131,453)		26,55 m ³ /s (22,4 m ³ /s)

Vier Sieleinzugsgebiete entwässern direkt in Wümme und Lesum, das Gebiet Kuhsiel gibt den größten Teil des Wassers über die Stauklappe Geerkenstau in der Kleinen Wümme in das Gebiet Wasserhorst ab. Bei starken Niederschlägen werden am Schöpfwerk Kuhsiel zwei Pumpen in Betrieb genommen, die in die Wümme entwässern.

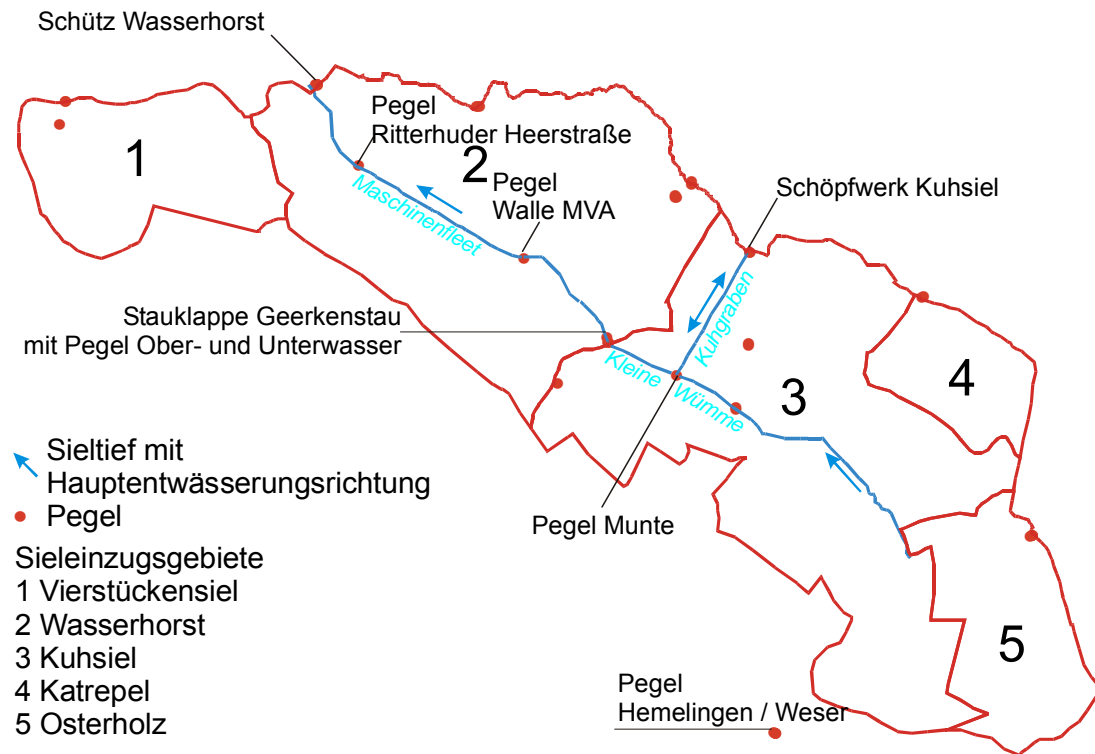


Abb. 5.2.1 FGM Lesum: Sieleinzugsgebiete, Pegel und Hauptsieltiefs Maschinenfleet, Kleine Wümme und Kuhgraben

Die Entwässerung der eingedeichten Gebiete erfolgt durch ein weitgehend künstliches Grabensystem. Siele und Schöpfwerke im umliegenden Deichring gewährleisten die Entwässerung des Niederungsgebiets. Bei Tidehochwasser und erhöhten Tideniedrigwasserständen sind Sielzüge für längere Zeit unterbrochen. Während dieser Zeitspannen müssen die Zuflüsse in das Grabensystem eingestaut oder über Schöpfwerke abgeführt werden. Die nördliche Hälfte des Verbandsgebiets ist durch Grünland mit Gewässerdichten über 15 000 m/km² geprägt. In der südlichen Hälfte überwiegen besiedelte Flächen mit einem weniger dichten Grabennetz mit einer Gewässerdichte unter 5 000 m/km². Die Grabenlängen, Grabeninhalte und Gewässerdichten der Sieleinzugsgebiete sind in Tab. A8 im Anhang zusammengefasst.

Für jedes Sieleinzugsgebiet ergeben sich aus landwirtschaftlicher und ökologischer Sicht in Abhängigkeit der Jahreszeit Soll- oder Meliorationswasserstände, die durch Siel- und Schöpfwerksbetrieb unter Berücksichtigung von Zuwässerungen einzuhalten sind (Tab. 5.2.2). Die Steuerung der Schöpfwerke erfolgt über obere und untere Regelwasserstände an Steuerpegeln. Überschreiten Wasserstände einzelne Regelstufen, wird eine Pumpe oder ggf. weitere Pumpen eingeschaltet. Bei Erreichen des unteren Regelwasserstandes werden die Pumpen ausgeschaltet. Im Winterhalbjahr werden die Regelwasserstände abgesenkt. Da beim Schöpfwerksbetrieb durch unregelmäßige manuelle Eingriffe in die Steuerung keine konstanten Betriebsregeln aufgestellt werden können, wurden mittlere Betriebsregeln für das Sommer- und Winterhalbjahr anhand der Schöpfwerksaufzeichnungen und Wasserstände am Betriebspegel abgeleitet.

Die Sieleinzugsgebiete wurden nach den Hauptsieltiefs in 157 Teilflächen mit einer durchschnittlichen Teilflächengröße von ca. 0,8 km² untergliedert. Die Teilflächen lehnen sich an die Hydrographische Karte Niedersachsen (1983) an. Im feinmaschigen Gewässernetz verlaufen die für das Modell angesetzten Wasserscheiden in Einzelfällen auch durch Gräben, was auch in der Natur durch die künstlich erzeugte Fließrichtung gegeben ist.

Tab. 5.2.2 Sollwasserstände an den Betriebspegeln

Sieleinzugsgebiet	Pegel Nr. und Lage des Pegels	Sollwasserstände [mNN]
Vierstückensiel	83 Vierstücken Binnen 500 m	Sommer (April - Okt) +0,45 Winter (Nov - März) +0,20 bis +0,30
Wasserhorst	4 Walle Müllverbrennungsanlage (MVA)	Sommer (April - Okt) +0,02 bis +0,15 Winter (Nov - März) -0,15 bis -0,02 Nach Bedarf und Witterung werden Sollwasserstände ggf. manuell angepasst
Kuhsiel	7 Munte	Sommer (April - Okt) +0,33 bis +0,35 Winter (Nov - März) +0,19 bis +0,21
Katrepel	42 Katrepel Binnen	+1,15 bis +1,25
Osterholz	62 Osterholz Binnen	Sommer (April - Okt) +1,85 bis +2,00 Winter (Nov - März) +1,82 bis +1,97

Die Abfluss- und Wasserstandsberechnung für das komplexe Grabensystem soll ausschnittsweise für die Sieleinzugsgebiete Wasserhorst und Kuhsiel,

die ca. 100 km² Fläche mit ca. 720 000 m Grabensystem umfassen, gezeigt werden (Abb. 5.2.2). Das Siel Wasserhorst mündet in die Lesum ca. 5 km oberhalb des Lesumsperrwerks, das ca. 1 km oberhalb der Mündung in die Weser liegt. Die Lesum unterliegt einem deutlichen Tideeinfluss. Die Außenwasserstände am Schütz Wasserhorst lagen im Kalenderjahr 1998 zwischen -1.5 mNN und +3.5 mNN. Das Gebiet Kuhsiel entwässert weitestgehend über das Gebiet Wasserhorst in die Lesum.

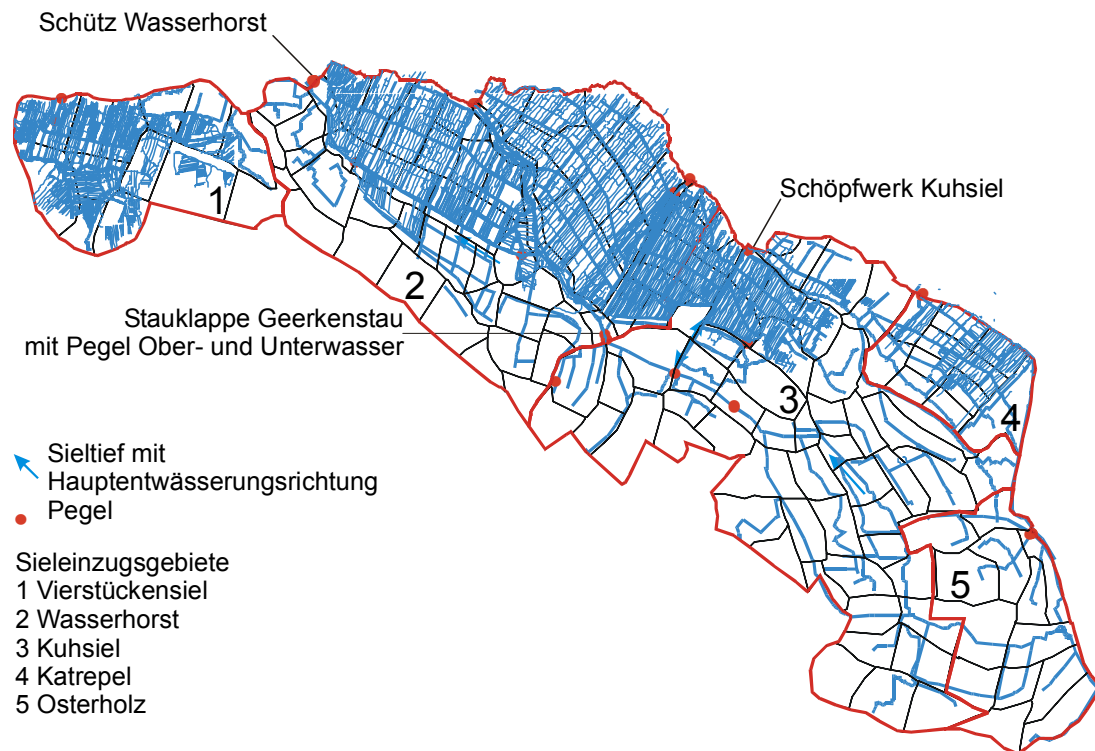


Abb. 5.2.2 Gewässernetz im FGM Lesum

Für die Wasserbauwerke Schütz Wasserhorst und Stauklappe Geerkenstau liegen Messreihen von Binnen- und Außenwasserständen sowie Aufzeichnungen über Klappen- bzw. Hubtorstellungen vor, aus denen Abflüsse anhand der Fließformeln für vollständigen und unvollständigen Überfall berechnet wurden. Die geförderten Abflüsse wurden anhand der Förderkurven sowie der aufgezeichneten Stromaufnahme und des Außenpeils berechnet. Für die Simulation der Betriebsweisen der beiden Siele wurden Module in NAXOS implementiert, die in den Kap. 4.5.3 (Schütz Wasserhorst) und 4.5.4 (Stauklappe Geerkenstau) näher beschrieben sind. Die Wasserbauwerke, Messreihen, Steuerpegel und Betriebsweisen für das FGM Lesum sind im Anhang in Tab. A7 zusammengestellt.

Das detaillierte Gewässernetz wurde von der Gewässerkarte Bremen 1:20 000 und von Luftbildern im Maßstab 1:5 000 digitalisiert und anhand der Gewässerbreite in drei Größenkategorien eingestuft. Für nahezu alle Hauptsieltiefs der Kategorie 1 liegen Querprofile vor. Den Kategorien 2 und 3 wurden Regelquerschnitte nach Abb. 5.2.3 zugewiesen. Die Festlegung der Regelquerschnitte für jede Kategorie erfolgte nach Vorgaben des Bremischen Deichbandes a. r. W. Weitere Eingangsdaten wie Topografie, Landnutzung und Boden sind in Maniak et al. (2000) beschrieben.

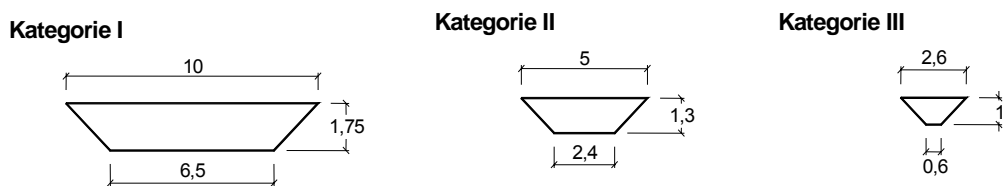


Abb. 5.2.3 Querschnitte in [m] der Grabenkategorien

5.2.2 Simulationen

Für die Simulationen mit dem FGM Lesum wurde das Kalenderjahr 1998 herangezogen. Für diesen Zeitraum liegen Niederschlagsaufzeichnungen von zwei Stationen mit einer Auflösung von fünf Minuten vor. Zusätzlich liegen Aufzeichnungen der Binnenwasserstände an vier Pegeln im Sieleinzugsgebiet Wasserhorst und an drei Pegeln im Sieleinzugsgebiet Kuhsiel sowie Klappen- bzw. Hubtorstellungen an den Sielen und Aufzeichnungen zum Schöpfwerksbetrieb mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten vor. Mit dem Hochwasserereignis im Oktober 1998 wird anhand des Sieleinzugsgebiets Wasserhorst ein Vergleich mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell vorgenommen (s. Kap. 6).

Die Abflüsse an Schütz Wasserhorst und Stauklappe Geerkenstau wurden anhand der Fließformeln für Zeitintervalle von 15 Minuten berechnet und anschließend einer Plausibilitätskontrolle unterworfen. Der effektive Niederschlag im Verbandsgebiet wurde anhand des mit NAXOS simulierten Gebietsniederschlags sowie des mittleren monatlichen Abflussbeiwerts des nahe gelegenen Pegels Hellwege-Schleuse ($A_{E0} = 908 \text{ km}^2$) in der Wümme

abgeschätzt. Die berechneten Abflüsse des Kuhsiels (über Geerkenstau und Schöpfwerk) liegen mit 18,095 Mio. m³ in der Größenordnung der abgeschätzten Zuflüsse von 20,797 Mio. m³ (Tab. A10 im Anhang).

Zuflüsse zum Siel Wasserhorst umfassen den effektiven Niederschlag, Qualmwasser und Zuwässerung, den Mischwasserabschlag am Pumpwerk MVA Walle sowie Zuflüsse aus dem Kuhsiel über den Geerkenstau. Über Zuwässerung bzw. Zuwässerungsmengen in das Gebiet Wasserhorst liegen keine vollständigen Aufzeichnungen vor. Nach Vorgabe des Bremischen Deichbandes a. r. W. wurde als Summe aus Zuwässerungen und diffusem Wassereintrag (z. B. Qualmwasser) ein Wert von 5 % der gesamten Gebietsentwässerung angesetzt. Die Summe der berechneten Abflüsse übersteigt mit 49,891 Mio. m³ die Summe der Zuflüsse von 37,219 Mio. m³ deutlich (Tab. A9 im Anhang). Da eine eindeutige Ursache für die Abweichung nicht gefunden werden konnte, werden die berechneten Abflüsse am Siel Wasserhorst pauschal um 40 % abgemindert. Nach der Abminderung haben Zufluss- und Abflussganglinie vergleichbare Summen und die mittleren monatlichen Abflussspenden im Sieleinzugsgebiet Wasserhorst liegen in der Größenordnung der Spenden des Kuhsiels.

Bei der Kalibrierung des FGM Lesum wurde eine mittlere jährliche Evapotranspiration von 500 mm ermittelt. Mit diesem Wert stimmen am Ende des Simulationszeitraums von einem Jahr die simulierten Abflusssummenlinien bei allen Sieleinzugsgebieten mit den berechneten Werten gut überein. Dieser Wert liegt im Bereich des langjährigen Mittels im Unterweserraum, der eine Spannweite zwischen 420 mm und 550 mm aufweist (Niedersächsischer Umweltminister, 1990, 1994). Die kalibrierten Modellparameter für Wasserhorst und Kuhsiel sind in Tab. 5.2.3 zusammengestellt.

Einen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Abfluss- und Wasserstandsganglinien haben bei der Simulation die Randbedingungen. Diese umfassen Sollwasserstand an den Sielen, die Regelung der Klappen bzw. Hubtorstellungen und die Höhe der Winterabsenkung des Sollwasserstandes zwischen April und Oktober, die für Siele und Schöpfwerke nicht gleich sein muss. Da die Sollwasserstände der Siele und Schöpfwerke z. T. manuell gesteuert werden, müssen für eine optimierte Modellanpassung an die gemessenen Wasserstände mittlere Regelwasserstände ermittelt werden. Dies erfolgt für Sommer- und Winterhalbjahr getrennt, da NAXOS eine datumsabhängige Winterabsenkung berücksichtigen kann. Die Klappen-

stellung an der Stauklappe Geerkenstau werden in Abhängigkeit von Betriebsregeln und vom Wasserstand am Betriebspegel Munte eingestellt. In Abb. A8a im Anhang sind die aufgezeichneten Wasserstände am Betriebspegel Munte und die Klappenstellungen für die Zeiträume Januar bis März, April bis Oktober und November bis Dezember 1998 aufgetragen. Die Schwankungsbreite der Klappenstellungen beträgt bei gleichen Wasserständen am Pegel Munte ca. 30 cm. Die bei der Optimierung ermittelten Regelwasserstände für die Wasserbauwerke sind in Tab. 5.2.4 zusammengefasst.

Tab. 5.2.3 Modellparameter für die Sieleinzugsgebiete Wasserhorst und Kuhsiel im FGM Lesum

Teilprozess	Modellparameter	Wasserhorst	Kuhsiel
Abflussbildung	Aufteilungsparameter anto [-]	0,15	0,35
	Anfangsbodenfeuchte bofeu [mm]	+10	-25
Abflusskonzentration	Speicherkonstanten-Faktoren:		
	Oberflächenabfluss	1	1
	Interflow	175	250
	Grundwasserabfluss	5 000	5 000
Basisabfluss	Anfangs-Basisabflussspende	8	6
Wellenverformung durch Ketten-speicher	Anfangsbinnenwasserstand für Wasserhorst und Kuhsiel	0 mNN	0,25 mNN

Die Simulation wurde mit einer Rechenschrittweite von 15 Minuten bei 3 Sub-Zeitschritten durchgeführt. Simulationen mit größeren Rechenschrittweiten zeigten schlechtere Modellergebnisse. Eine weitere Verringerung der Rechenschrittweite führte nicht durchgehend zu besseren Modellergebnissen (Tab. 5.2.5).

Die mit NAXOS für Kuhsiel und Wasserhorst simulierten Abflüsse und Wasserstände sowie die simulierten Fördermengen der Schöpfwerke zeichnen die beobachteten Wasserstände und berechneten Abflüsse in der richtigen Größenordnung nach. Die Abfluss- und Wasserstandsganglinien für das gesamte Kalenderjahr 1998 sind im Anhang in Abb. A10 bis A15 aufgeführt. Charakteristische Ausschnitte aus den simulierten Wasserstands- und Abflussganglinien sind in Abb. 5.2.5 bis 5.2.9 dargestellt.

Tab. 5.2.4 Regelwasserstände und Winterabsenkung für die Sieleinzugsgebiete Wasserhorst und Kuhsiel im FGM Lesum

Sieleinzugsgebiet	Regelorgan und Betriebspegel	Sollwasserstand [mNN]
Wasserhorst	Siel / Walle MVA	Sommer (April - Okt): +0,08 mNN Winterabsenkung: 7 cm Stellung der Hubtore nach Betriebsplan (s. Abb. A7 im Anhang)
	Schöpfwerk / Walle MVA	W _{Walle} [mNN] Förderstrom [m³/s] 0,10 3,50 0,12 7,00 0,15 10,50 0,18 14,00 Winterabsenkung: 12 cm
Kuhsiel	Siel / Munte	W _{Munte} [mNN] Stauklappenhöhe [mNN] 0,20 0,95 0,25 0,93 0,30 0,90 0,35 0,85 0,40 0,80 Winterabsenkung: 17,5 cm
	Schöpfwerk / Munte	W _{Munte} [mNN] Förderstrom [m³/s] 0,45 2,20 0,50 3,30 0,55 4,40 Winterabsenkung: 10 cm

Die Abflusssummenlinien geben bei den Schwankungen der Abflüsse einen guten Überblick über den Gang der Abflüsse im Jahr 1998. Die simulierten Abflusssummen beider Sieleinzugsgebiete weichen über das ganze Jahr nur wenig von den berechneten Abflüssen ab (Abb. 5.2.4), die Simulation des Wasserhaushaltes mit NAXOS gelingt gut. Im November und Dezember (ab Markierung 1) weichen die simulierten Abflüsse am Kuhsiel wegen der manuell veränderten Sollwasserstände um ca. 25 % von den berechneten Abflüssen ab. Die mittlere Abweichung zwischen den berechneten und simulierten Abflüssen aus dem Gebiet Wasserhorst beträgt 4,8 %, am Siel Kuhsiel 6,1 %. Anhand der Kreuzkorrelationen lässt sich feststellen, dass bei allen Ganglinienvergleichen die beste Übereinstimmung ohne zeitliche Verschiebung der Zeitreihen erzielt wird, d. h. modellbedingte systematische

Verzögerungen zwischen Niederschlagsinput und simulierten Binnenwasserständen treten nicht auf.

Der berechnete Abfluss aus dem Gebiet Wasserhorst wird zu ca. 58 % von Schöpfungen gebildet. Das Schöpfwerk Kuhsiel entwässert nicht wie das Siel Kuhsiel in das Sieleinzugsgebiet Wasserhorst, sondern in die Wümme. Die berechneten Summenlinien der Schöpfungen werden von NAXOS für beide Schöpfwerke Wasserhorst und Kuhsiel hinsichtlich des Verlaufes ebenfalls gut nachgebildet. Die simulierten Schöpfungen sind meist etwas zu niedrig und weichen im Mittel um 11 % beim Schöpfwerk Wasserhorst und um 18 % beim Schöpfwerk Kuhsiel von den berechneten Größen ab. Diese Abweichungen werden bei der Simulation durch höhere gesielle Abflüsse kompensiert.

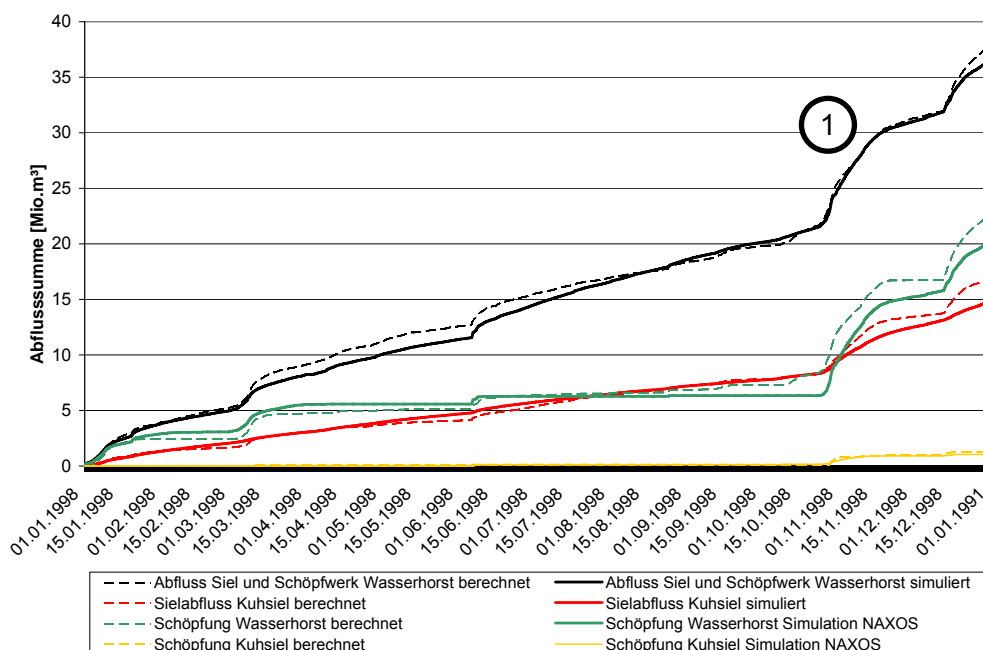


Abb. 5.2.4 Berechnete und simulierte Abflusssummen an den Sielen der Gebiete Wasserhorst und Kuhsiel

Die beobachteten Wasserstände am Pegel 5 Geerkenstau Binnenpeil zeigen im Sommer 1998 einen mittleren Wasserstand von ca. 0,34 mNN. Die Simulation der Wasserstände im Sommerhalbjahr gelingt mit mittleren Abweichungen von 1,4 cm. Im Frühjahr werden Wasserstände von ca. 0,25 mNN und 0,18 mNN mehrere Wochen gehalten, ab November liegt der mittlere Wasserstand bei 0,1 mNN. Die bei NAXOS eingestellte Winterabsenkung der Sollwasserstände von 0,175 m kann die wechselnden Sollwasserstände

nicht nachbilden, die mittlere Abweichung beträgt im Kalenderjahr 1998 3,9 cm.

Tab. 5.2.5 Abweichungsparameter zwischen simulierten und berechneten Werten der Sieleinzugsgebiete Wasserhorst und Kuhsiel und Abhängigkeit vom Zeitschritt t

Parameter / Ganglinie	Zeitschritt [h], Korrelations- koeffizient r	Zeitschritt [h], Abweichung Q nach Nash- Sutcliffe R ²	Mittlere Abweichung W [cm]
Schütz Wasserhorst Abfluss	0,1: 0,605 0,25: 0,556 0,5: 0,519	0,1: 0,295 0,25: 0,339 0,5: 0,345	-
Stauklappe Geerkenstau (Kuhziel) Abfluss	0,1: 0,81 0,25: 0,782 0,5: 0,755	0,1: 0,380 0,25: 0,494 0,5: 0,658	-
Schütz Wasserhorst Binnenwasserstand	0,1: 0,704 0,25: 0,714 0,5: 0,657	-	4,4 cm
Stauklappe Geerkenstau (Kuhziel) Binnenwasserstand	0,1: 0,955 0,25: 0,943 0,5: 0,91	-	3,9 cm
Betriebspegel Walle Wasserstand	0,1: 0,691 0,25: 0,676 0,5: 0,653	-	3,1 cm
Betriebspegel Munte Wasserstand	0,1: 0,978 0,25: 0,972 0,5: 0,934	-	3,3 cm

Die Stauklappe Geerkenstau reagiert schnell auf Wasserstandsänderungen am Betriebspegel Munte. Innerhalb eines Zeitraums von einer Stunde liegen häufig vier verschiedene aufgezeichnete Klappenstellungen und unterschiedliche Abflüsse vor. Die Stauklappe reagiert in der Praxis auf geringe Wasserstandsänderungen am Betriebspegel Munte, die meist im Bereich von 1 - 2 cm schwanken. In der Praxis wird die Stauklappe häufig so weit hochgefahren, dass der Abfluss unterbunden wird. Die Simulation der Stauklappe kann mit NAXOS nicht vergleichbar detailliert erfolgen, da die Klappenstellung in Abhängigkeit von den Wasserständen in Munte nur in Schritten von 5 cm verändert wird. Hierdurch simuliert NAXOS einen gleichmäßigeren

Abfluss und die Wasserstandsschwankungen sind geringer. Am Beispiel der Abb. 5.2.5 ist erkennbar, dass die von NAXOS simulierte Wasserstände und Abflüsse geringere Schwankungen aufweisen. Vereinzelt Wasserstandsabsenkungen wie bei Markierung 1 in Abb. 5.2.5, die nicht auf Wasserstandsanstiege am Betriebspegel Munte zurückgehen, können von NAXOS nicht simuliert werden.

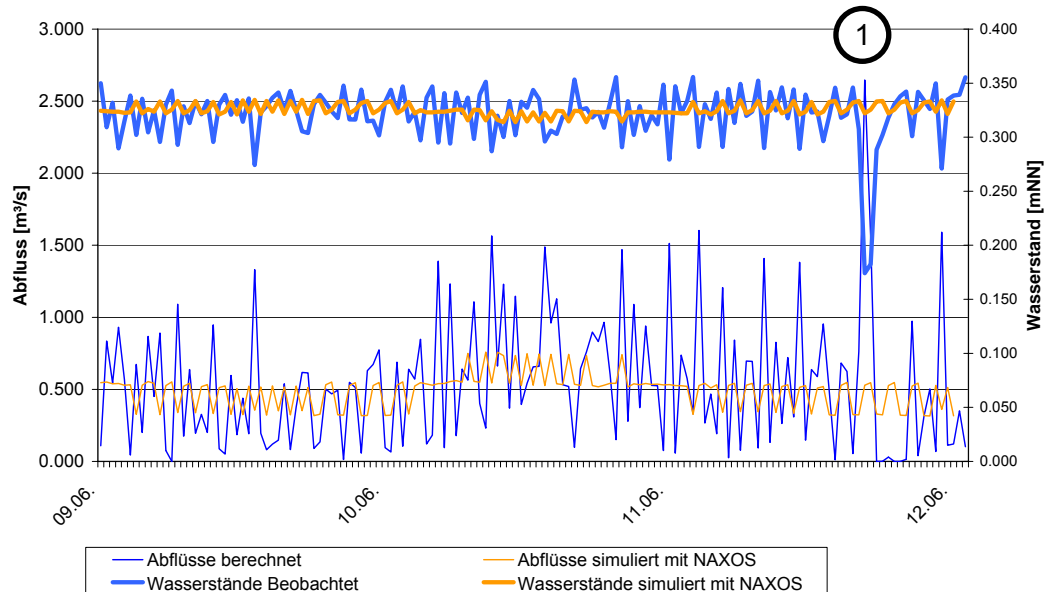


Abb. 5.2.5 Beobachtete und simulierte Wasserstände am Pegel Geerkenstau Binnenpeil zwischen 09.06. und 12.06.1998

Die simulierten gesielten und geförderten Abflüsse am Schütz Wasserhorst hängen neben dem Binnen- und Außenpeil am Gebietsauslass von den simulierten Wasserständen am Betriebspegel Walle ab. Der Ausschnitt vom 05.06. bis 12.06.1998 in Abb. 5.2.6 zeigt die Wasserstände am Pegel Walle und am Schütz Wasserhorst. Die von NAXOS simulierte Wasserstandsganglinie am Pegel Walle ist bei den meisten Sielzügen gedämpfter als die beobachtete Ganglinie. Infolge der Abweichungen der simulierten von den beobachteten Wasserständen am Betriebspegel werden die Schöpfwerke von NAXOS zu abweichenden Zeitpunkten und ggf. mit abweichenden Förderleistungen simuliert. Im Zeitraum zwischen 05.06. und 12.06.1998 sind ca. 60 % des Abflusses geschöpft. Stimmen beobachtete und simulierte Wasserstände in Walle überein, weisen die folgenden freien Sielzüge den gleichen Wasserstandsgang auf (Markierungen 1 in Abb. 5.2.6), wenn nicht

vorangegangener Schöpfwerksbetrieb die Wasserstände absenkt. Bei den Markierungen 2 in Abb. 5.2.6 wird jeweils über mehr als sechs Stunden kontinuierlich geschöpft, die simulierten Wasserstände am Schütz weichen kurzzeitig um bis zu 20 cm von den beobachteten ab. Die mittlere Wasserstandsabweichung am Schütz beträgt für das Jahr 1998 4,4 cm.

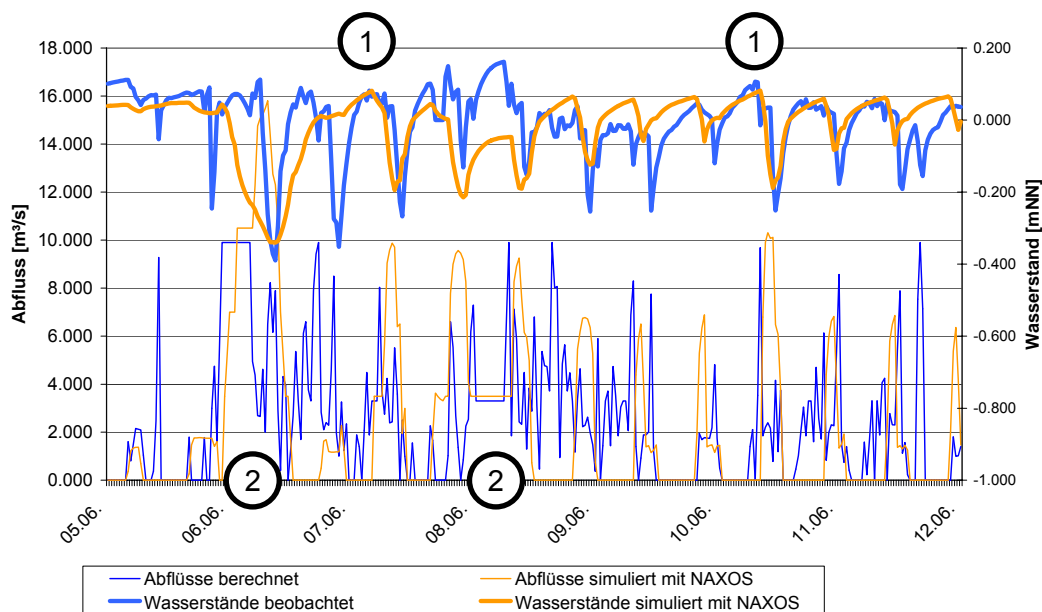


Abb. 5.2.6 Beobachtete und simulierte Wasserstände am Schütz Wasserhorst Binnenpeil zwischen 05.06. und 12.06.1998

Die Wasserstandsregelung am Betriebspegel Walle entspricht damit einem Regelkreis (Abb. 5.2.7), bei dem die Landflächenabflüsse, der Zufluss aus dem Kuhsiel und der Abfluss im Sieltief die Störgrößen darstellen. Jede Abweichung der simulierten „Störgrößen“ von den tatsächlichen Größen führt zu Abweichungen der simulierten Wasserstände von den Beobachtungen, bis der Regelmechanismus bei der Simulation wieder die beobachteten Größen erreicht.

Die simulierten Wasserstände am Betriebspegel Walle MVA zeichnen mit geringen mittleren Abweichungen von 3,1 cm die beobachteten Wasserstände nach (Abb. A14 im Anhang). Die simulierten Wasserstände entsprechen dabei mit geringen Wasserstandsschwankungen von unter 5 cm den bei der Simulation vorgegebenen mittleren Sollwasserständen und weichen nur bei Starkregen davon ab. Die ab dem 26.10.1998 manuell auf

-0,05 bis -0,1 mNN abgesenkten Wasserstände werden von NAXOS nicht nachgebildet.

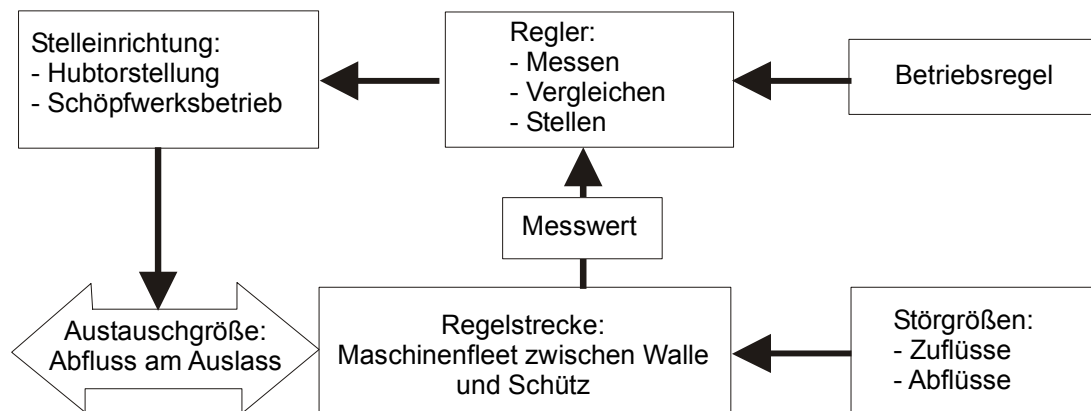


Abb. 5.2.7 Regelkreis: Wasserstand am Betriebspegel Walle und Steuerung von Schützstellung und Schöpfwerksbetrieb (Wasserhorst)

Am Betriebspegel Munte im Kuhsiel (Abb. A15 im Anhang) werden die Sollwasserstände für Sommer- und Winterbetrieb eingehalten. Die beobachteten Wasserstände schwanken im Mittel um ca. 3 cm. Die für die Simulation des gesamten Kalenderjahres eingestellte Winterabsenkung von 17,5 cm resultiert in bis Anfang April 1998 zu niedrig simulierten Wasserständen. Im Sommerhalbjahr werden die Wasserstände mit einer mittleren Abweichung von 1,7 cm nachgebildet. Durch die Absenkung des Sollwasserstandes ab 26.10.1998 auf ca. 0,15 mNN, die im Frühjahr bei 0,25 mNN bzw. 0,2 mNN lag, werden die Wasserstände um ca. 5 – 10 cm zu hoch simuliert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Niederschlag-Abfluss-Simulation mit NAXOS in beiden Sieleinzugsgebieten zu guten Ergebnissen führt, wenn die aufgestellten Betriebsregeln für die Wasserstandsregulierung in der Praxis eingehalten werden. Die gute Übereinstimmung zwischen simulierten und berechneter Abflusssummenlinien über nahezu den gesamten Untersuchungszeitraum zeigt, dass der Wasserhaushalt über mehrere Monate mit dem verwendeten Abflussbildungsansatz gut nachgebildet werden kann. Die simulierten Wasserstandsabsenkungen an den Sielbauwerken infolge Sielzug (Sielzugfall) und Schöpfung zeichnen die beobachteten Absenkungen gut nach, wenn die simulierten Hubtor- bzw. Klappenstellungen den aufgezeichneten Stellungen entsprechen. Hieraus ergibt sich, dass die Parametrisierung der Speicherräume anhand der aufge-

nommenen Querprofile für die Hauptsieltiefs und der Regelprofile für die übrigen Gräben die tatsächlichen Verhältnisse gut abbilden kann.

6 Vergleichende Berechnungen mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell

6.1 Allgemeines

Das hydrodynamisch-numerische Modell ISIS wurde bereits in vorangegangenen Untersuchungen am Käseburger Siel erfolgreich eingesetzt (Maniak et al., 2000). Mit dem Modell ISIS sollen beispielhaft Wasserstände für das Hauptsieltief des Sieleinzugsgebiets Wasserhorst im Einzugsgebiet der Lesum simuliert werden. Das Hauptsieltief zwischen Geerkenstau und Schütz Wasserhorst wird im Wesentlichen vom Maschinenfleet und zu einem kleineren Teil von der Kleinen Wümme gebildet (vgl. Abb. 5.2.1). Das hydrodynamisch-numerische Modell wird als *HN-Modell* bezeichnet. Die Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet mussten durch das N-A-Modell NAXOS bereitgestellt werden, da hierüber Angaben - wie in Tidegebieten allgemein - fehlen. Es folgt ein Vergleich der simulierten Wasserstände zwischen dem Modell NAXOS mit Kettenspeicheransatz und dem HN-Modell. Da im Hauptsieltief Wasserstandsaufzeichnungen an vier Pegel vorliegen, ist für beide Modelle eine gute Verifikationsmöglichkeit gegeben.

ISIS ist ein eindimensionales (1D) hydrodynamisch-numerisches Modell (Halcrow Group Ltd., 1999b). Es berechnet anhand von Randbedingungen die Wasserspiegellage für Querprofile eines Fließabschnittes, wobei Randbedingungen durch Abfluss- und Wasserstandsganglinien sowie durch gesteuerte Wasserbauwerke vorgegeben werden können. Die Berechnung der Wasserspiegellage kann für stationäre und instationäre Zustände erfolgen. Die Lösung der Differentialgleichungen nach St. Venant erfolgt anhand eines impliziten Differenzenverfahrens (vgl. Kap. 4.1). ISIS ermöglicht bei der Simulation (vergleichbar mit dem N-A-Modell NAXOS) die Berücksichtigung von Speichern, Sielen und Pumpen. Querprofile, Pumpen, Speicher und Einmündungen werden als Elemente bezeichnet, deren Anzahl in ISIS durch Lizenzrechte begrenzt ist. Für die Untersuchung stand eine Lizenz für bis zu 250 Elemente zur Verfügung. Weitere hydraulisch wirksame Elemente wie Kreuzungen, Brücken(-pfeiler) und Durchlässe, die bei HN-Modellen gängige

Elemente darstellen, sollen hier nicht näher erläutert werden. Für Details zur Bedienung des Programms wird auf das Handbuch für ISIS (Halcrow Group Ltd., 1999a und 1999b) verwiesen.

Alle Eingangsdaten für das HN-Modell wie Querprofile, Querprofilabstände, Einmündungen und Inhaltslinien von Speichern, Pumpen, Wehre, hydraulische Randbedingungen (Wasserstands- und Zuflussganglinien) sowie Programmoptionen werden in einer einzigen Modelldatei zusammengefasst. Der Modellaufbau umfasst den Import von Querprofilen mit Kilometrierung, die Bereitstellung von Zulaufganglinien, einer Wasserstandsganglinie als untere Randbedingung sowie die Vorgabe von Geometrie und Steueranweisung für die Siele und Schöpfwerke. Die Kalibrierung des Modells erfolgt durch Änderung der Sohlrauheit und ggf. Anpassung der Steueranweisungen für das Wasserbauwerk. Die Güte der Anpassung wird durch optischen Vergleich der berechneten und gemessenen Wasserstandsganglinien durchgeführt.

6.2 Verwendete hydraulische Elemente

6.2.1 Speicher

Zur Nachbildung von zusammenhängenden Entwässerungsgräben in großer Anzahl können diese als ein logischer Speicher zusammengefasst werden. Der logische Speicher entwässert in einen Fließabschnitt oder einen weiteren Speicher. Die Speicherinhaltslinie wird anhand einer tabellarisch vorzugebenden Wasserstand-Speicheroberfläche-Beziehung vom Programm berechnet. Der Auslass jedes Speichers ist durch ein Querprofil mit dem Hauptsieltief verbunden. Die Querprofile am Auslass eines Speichers werden als *Überlaufprofile* bezeichnet.

6.2.2 Siele

Im Untersuchungsgebiet sind mit der Stauklappe Geerkenstau und dem Schütz Wasserhorst zwei Siele vorhanden, für die geometrische Abmessungen und die von ISIS verwendeten Abflussformeln im Folgenden erläutert sind.

Stauklappe Geerkenstau

Der Abfluss über die Stauklappe ist abhängig von der Klappenstellung und einem zu kalibrierenden Überfallbeiwert μ .

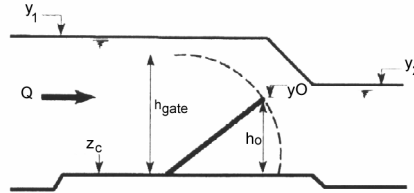


Abb. 6.2.1 Schematische Darstellung einer Stauklappe

(aus: Halcrow, 1999b)

Die Klappenstellung wird bei der Simulation als Höhe y_O zusammen mit Wasserständen oberhalb y_1 und unterhalb y_2 über die Zeit vorgegeben. Der Abfluss über die Stauklappe berechnet sich zu (Halcrow, 1999b):

$$Q = 0,5 \mu b g^{1/2} \psi (y_1 - y_O)^{1,5} \quad (\text{Gl. 6.2.1})$$

mit

$$W\theta = 57,3 \frac{1}{\sin\left(\frac{y_O - z_c}{h_{\text{gate}}}\right)}$$

wenn $W\theta \geq 30$

$$\psi = 0,711 (1 - \Phi) + 0,58 \Phi (1 + 0,13 h_p)$$

sonst

$$\psi = 0,711$$

$$\Phi = (W\theta - 30) / 60$$

$$h_p = (y_1 - y_O) / (y_O - z_c) \quad [-]$$

z_c : Sohlhöhe der Stauklappe in der aktuellen Stellung [mNN]

h_{gate} : Länge einer Stauklappe [m]

y_1 : Wasserstand oberhalb der Stauklappe [m]

y_2 : Wasserstand unterhalb der Stauklappe [m]

y_O : Oberkante der Stauklappe [mNN]

$W\theta, \psi, \Phi$: Variablen [-]

Schütz Wasserhorst

In ISIS kann das Schütz Wasserhorst mit zwei nach oben und unten beweglichen Hubtoren nicht direkt vorgegeben werden. An seiner Stelle wird als hydraulisches Element ein Schütz mit einem nach oben beweglichem Hubtor für die Modellierung verwendet. Sechs verschiedene Hubtorstellungen werden durch sechs einzelne, parallel angeordnete Schütze repräsentiert, wobei jedes Schütz im geöffneten Zustand die Abmessungen einer der in Tab. 6.2.1 vorgegebenen Hubtorstellung aufweist. Durch Vorgabe logischer Steueranweisungen wird sichergestellt, dass bei der Simulation jeweils nur eines der sechs Schütze geöffnet ist.

Tab. 6.2.1 Stellungen für linkes und rechtes Hubtor am Schütz Wasserhorst

Schütz-Nr.	Stellung links	Stellung rechts	Öffnungshöhe [m]
1	0 bzw. 6	0 bzw. 2	0 oder offen
2	5	1	0,40
3	4	-	0,40
4	3	-	0,40
5	2	-	0,40
6	1	-	0,40

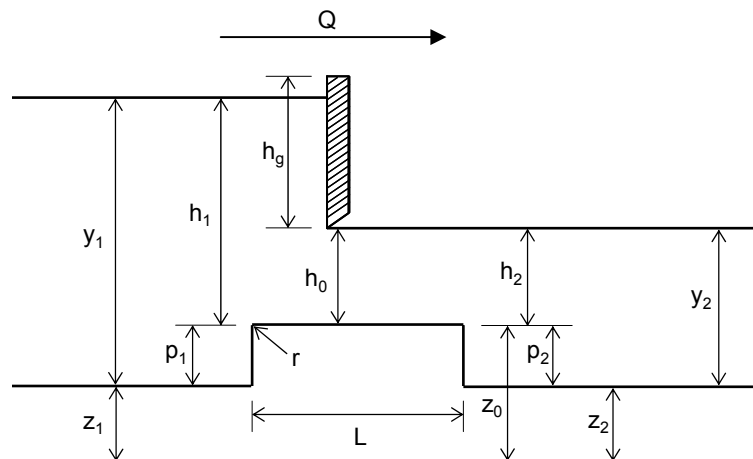


Abb. 6.2.2 Schematische Darstellung eines Schützes

(aus: Halcrow, 1999b)

Tab. 6.2.2 Hydraulische Gleichungen für ein Schütz mit Hubtor
(Halcrow, 1999b). Die Gleichungen 6 + 2, 7 + 2 und 7 + 3 können
miteinander kombiniert werden

Stellung	Beschreibung	Gleichung
1	Tor geschlossen	Kein Abfluss
2	Tor geschlossen, vollständiger Überfall	$Q = C_{vs} C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} b (h_1 - h_g - h_0)^{3/2}$ $C_e = 0,602 + 0,075 \frac{(h_1 - h_g - h_0)}{(p_1 + h_g + h_0)}$
3	Tor geschlossen, unvollständiger Überfall	$Q = C_{vs} C_{rf} \frac{2}{3} \sqrt{2g} b (h_1 - h_g - h_0)^{3/2}$ $C_{vs} = \left[\frac{1 - (h_2 - h_g - h_0)^{3/2}}{(h_1 - h_g - h_0)^{3/2}} \right]^{0,385}$
4	Tor offen, vollkommener Aus- fluss aus großer Öffnung	$Q = C_{cd} C_{vw} \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \sqrt{g} b (h_1 - h_g - h_0)^{3/2}$ $C_d = [1 - \delta(L - r)/b] [1 - \delta(L - r)/2h_1]^{3/2}$ $\delta = 0,01$
5	Tor offen, Schlitzsielen	$Q = C_{cd} C_{vw} \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \sqrt{g} b h_1 \sqrt{(h_1 - h_2)/(1 - m)}$
6	Tor offen, vollkommener Über- fall	$Q = 0,6 C_{vg} b h_0^{3/2} \sqrt{2g} \sqrt{((h_1/h_0) - \alpha)}$
7	Tor offen, unvollkommener Überfall	$Q = C_e C_{vg} \sqrt{2g} b h_0 \sqrt{h_1 - h_2}$ $C_e = 0,61 [1 + 0,15(b + 2h_0)/(2b + 2h_0)]$

6.2.3 Schöpfwerk

Schöpfungen werden als Abflussganglinie vorgegeben oder bei der Simulation anhand logischer Anweisungen berechnet. Höhenabhängige Förderleistungen können durch eine einzelne Wasserstand-Abfluss-Beziehung oder durch mehrere, unterschiedlich gesteuerte Schöpfwerke nachgebildet werden.

6.3 Aufbau des HN-Modells und Kalibrierung

Im Hauptsieltief bestehen innerhalb des Sieleinzugsgebiets Wasserhorst vier Wasserstandspegel: Schütz Wasserhorst Binnen (Pegelnummer 2), Ritterhuder Heerstraße (3), Walle Müllverbrennungsanlage (MVA) (4) und Geerkenstau Unterwasser (5) (vgl. Abb. 5.2.1).

Das HN-Modell umfasst rd. 9 000 m Fließstrecke (ca. 6 500 m Maschinenfleet, ca. 2 500 m Kleine Wümme) mit 65 Querprofilen für das Hauptsieltief. Gewässer, die seitlich in den Hauptstrang einmünden, sind durch Einmündungs-Elemente mit dem Hauptstrang verbunden. Die Modellstruktur ist in Abb. 6.3.1 dargestellt.

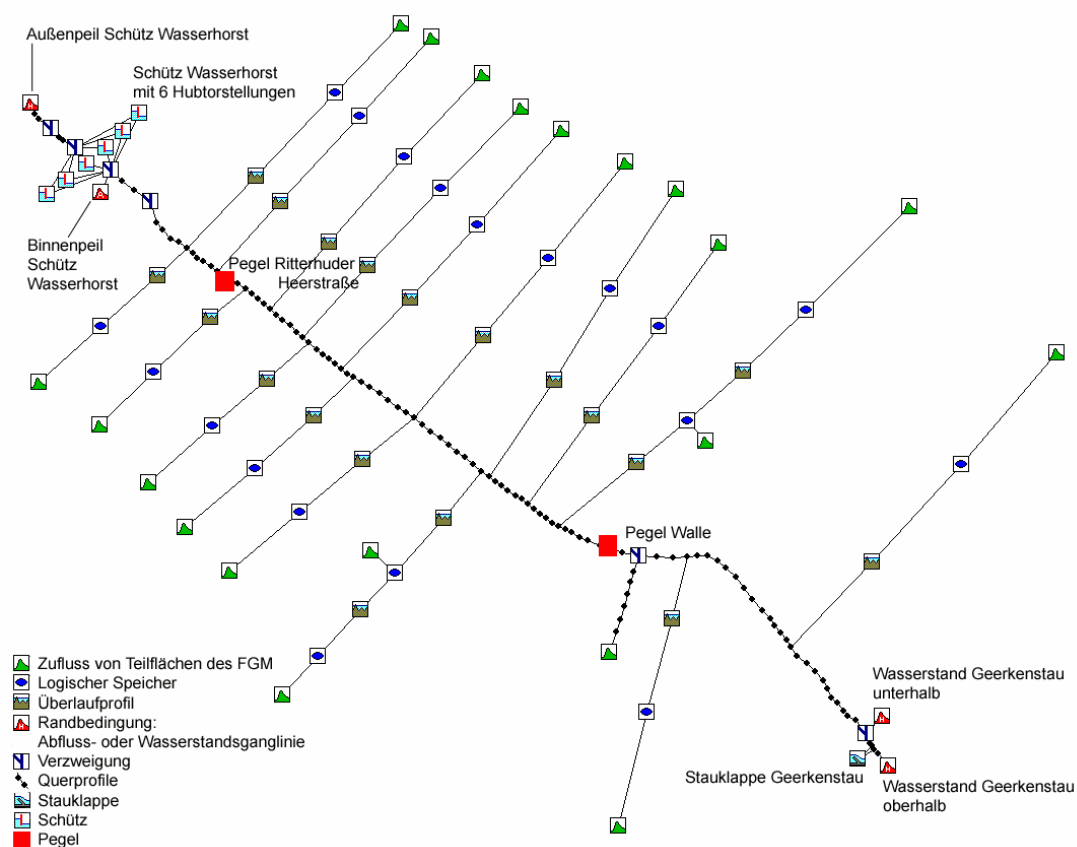


Abb. 6.3.1 Struktur des HN-Modells und Bedeutung der Symbole

Obere Randbedingungen für das HN-Modell sind mit NAXOS simulierte Landflächenabflüsse, die Zuflüsse von der Müllverbrennungsanlage (MVA) Walle, die Zuflüsse über die Stauklappe Geerkenstau aus dem Kuhsiel und die Wasserstände am Pegel unterhalb Geerkenstau. Die Zuflüsse aus dem

Kuhsiel werden anhand vorgegebener Klappenstellungen und vorgegebener Wasserstände ober- und unterhalb der Stauklappe simuliert.

Bei den Vergleichsrechnungen werden die unteren Randbedingungen für das HN-Modell durch Ganglinien der Hubtorstellungen am Schütz, Schöpfungen und der gemessenen Außenwasserstände am Schütz vorgegeben. Damit die Kalibrierung der Sohlrauheiten nicht von der Abflussberechnung am Schütz überlagert wird, werden zusätzlich die beobachteten Binnenwasserstände am Schütz vorgegeben. Proberechenläufe mit logischer Steuerung des Schöpfwerks führten wegen der in der Praxis wechselnden Betriebsregeln im Simulationszeitraum zu einer deutlich schlechteren Übereinstimmung und wurden daher nicht für den Vergleich herangezogen.

Die Gewässer, die dem Hauptsieltief seitlich zufließen, werden durch 19 logische Speicher repräsentiert. Jeder Speicher ist mit einem als *Überlaufprofil* bezeichneten Querprofil der Kategorie 2 (s. Abb. 5.2.3) an das Hauptsieltief angeschlossen. Die Überlaufprofile haben bei allen Speichern die gleiche Form und Breite. Jedes Überlaufprofil wurde vertikal so verschoben, dass die Oberkante jedes Profils an der Einmündung in das Hauptsieltief der Oberkante des Sieltiefs entspricht.

Das HN-Modell wurde anhand des Hochwassers im Oktober 1998 zwischen 15.10. und 30.10.1998 über den Strickler-Rauheitsbeiwert kalibriert. Ab dem 26.10.1998 (ca. Intervall 280) wird der Sollwasserstand am Betriebspegel Walle um ca. 10 bis 15 cm abgesenkt. Eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Wasserständen an den Pegeln Ritterhuder Heerstraße und Walle MVA wurde mit einer Rauheit nach Manning $n = 0,03$ (entspricht $k_{St} = 33$) erzielt. In den Abb. 6.3.2 und 6.3.3 sind die an Pegel 4 (Walle MVA) und Pegel 3 (Ritterhuder Heerstraße) simulierten Wasserstände den Beobachtungen gegenübergestellt.

Am Pegel Walle MVA (Abb. 6.3.2) können die beobachteten Wasserstände durch das HN-Modell gut nachgebildet werden, der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,955$. Ab Markierung 1 führen Zuflüsse aus dem Kuhsiel zwischen $2 \text{ m}^3/\text{s}$ und $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$ zu einem Wasserspiegelanstieg. Dieser kann nur zeitverzögert simuliert werden. Beim Pegel Ritterhuder Heerstraße ist $r = 0,986$. Die simulierten Wasserstände weichen bei der Markierung 1 und nach der Markierung 2 in Abb. 6.3.3 trotz vorgegebener Binnenwasserstände am Schütz mit um bis zu 10 cm ab. Die mittlere Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Wasserständen für Pegel 3 und 4 beträgt weniger als 2 cm.

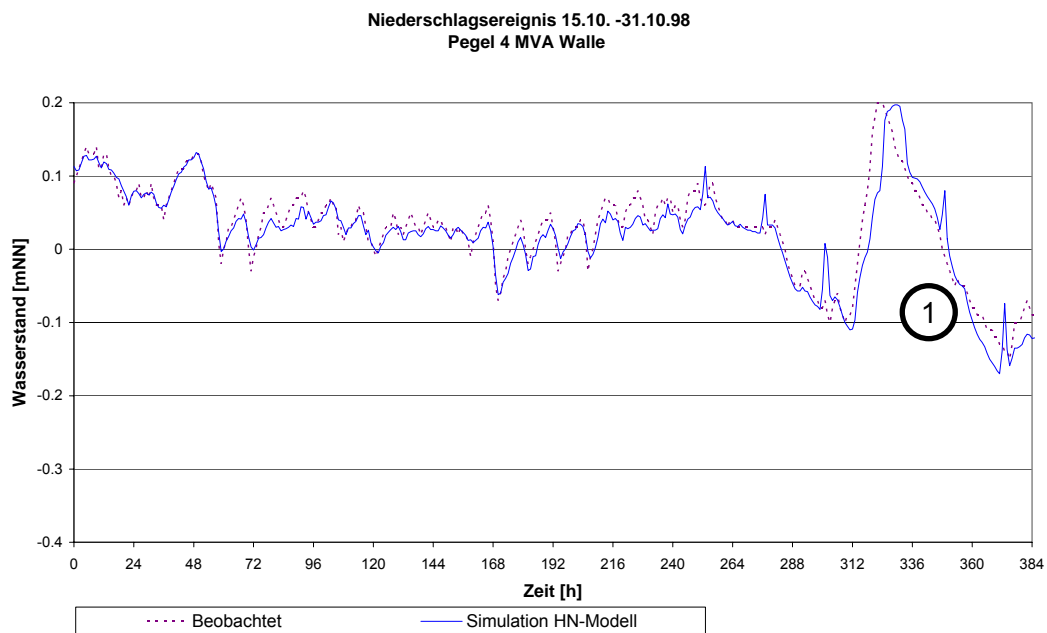


Abb. 6.3.2 Mit dem HN-Modell simulierte und gemessene Wasserstände am Pegel 4 (Walle MVA) bei der Kalibrierung

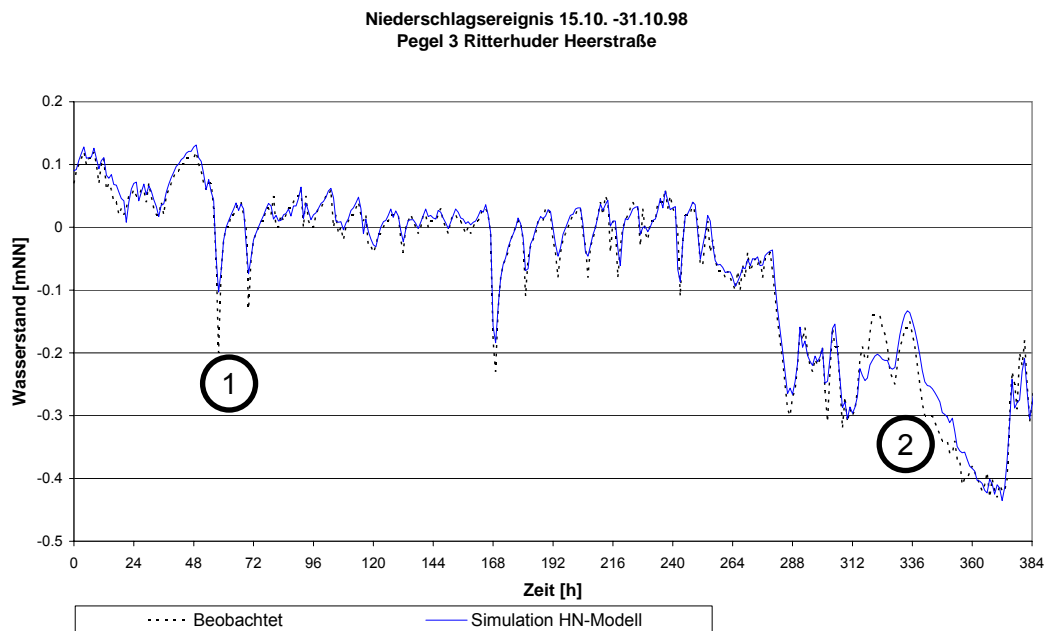


Abb. 6.3.3 Mit dem HN-Modell simulierte und gemessene Wasserstände am Pegel 3 (Ritterhuder Heerstraße) bei der Kalibrierung

6.4 Vergleich simulierter Wasserstände von HN-Modell und N-A-Modell

An den vier Pegeln im Maschinenfleet erfolgt der Vergleich der simulierten Wasserstände aus den Modellrechnungen mit dem HN-Modell und dem N-A-Modell. Die Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten Wasserstände werden durch mittlere Abweichung W_m [cm] und Korrelationskoeffizienten r [-] ausgedrückt. Markante Abweichungen der simulierten Wasserstände von den Messungen sind in den abgebildeten Ganglinien gekennzeichnet und werden erläutert.

Für einen operationellen Einsatz, wie er mit dem N-A-Modell NAXOS erfolgen kann, sind als untere Randbedingung logische Steueranweisungen für Schütz und Schöpfwerkssteuerung vorzugeben. Beim HN-Modell konnten jedoch keine zufrieden stellenden Ergebnisse bei logischer Steuerung des Schöpfwerks erzielt werden. Als untere Randbedingungen werden für das HN-Modell daher das logisch gesteuerte Schütz Wasserhorst, die gemessenen Außenwasserstände am Schütz Wasserhorst und die geförderten Abflüsse des Schöpfwerks Wasserhorst angesetzt. Für das Schütz werden die Stellungen für zwei vertikale Hubtore über die Zeit vorgegeben.

Werden die Binnenwasserstände am Schütz nicht als untere Randbedingung vorgegeben, so verschlechtern sich beim HN-Modell die Simulationsergebnisse gegenüber der Kalibrierung merklich.

Zur Einhaltung möglichst gleicher unterer Randbedingungen für HN-Modell und N-A-Modell erfolgen die Modellrechnungen mit NAXOS in Variante 1 unter Vorgabe der gesielten Abflüsse und Schöpfungen als Ganglinie. In der Variante 2 werden mit NAXOS die Hubtorstellungen, gesielten Abflüsse und Schöpfungen wie bei der Langfristsimulation (Kap. 5.2) anhand mittlerer Steuerregeln für jeweils Sommer- und Winterhalbjahr simuliert. Gegenüber der Langfristsimulation wurden die vom Vorregen abhängigen Parameter Anfangs-Basisabflussspende und Anfangsbodenfeuchte optimiert sowie die Winterabsenkung des Meliorationswasserstandes auf 5 cm am Schütz Wasserhorst und 12 cm am Schöpfwerk eingestellt.

Bei der Kalibrierung des FGM Lesum (Kap. 5.2) hat sich gezeigt, dass die Umstellung der Meliorationswasserstände durch den vom Bremischen Deichband a. r. W. im Jahr 1998 nicht (wie nach Betriebsplan vorgesehen) erst Anfang November erfolgte (Tab. 5.2.2) und dass die einzuhaltenden

Wasserstände durch manuelle Eingriffe in die Wasserstandsregelung variierten. Durch die Überlagerung der Absenkung des Sollwasserstandes mit einem Starkregenereignis und manuellen Eingriffen in die Wasserstandsregelung können für den Simulationszeitraum nur mittlere Steuerregeln für die Simulation der Wasserbauwerke vorgegeben werden. Durch Vorgabe des 26.10.1998 (Intervall 264) als Umstellungsdatum der Winterabsenkung lassen sich beim FGM die besten Simulationsergebnisse erzielen. Derartige Einstellungen sind mit ISIS nicht möglich, vielmehr müssen alle wasserstandsabhängigen Klappen- und Hubtorstellungen für den gesamten Rechenzeitraum fest vorgegeben werden, was den praktischen Einsatz des HN-Modells z. B. für Vorhersagen einschränkt.

Die Summenlinie der Abflüsse am Schütz Wasserhorst in Abb. 6.4.1 zeigt, dass mit rd. 4,1 Mio. m³ der überwiegende Teil des Gebietsabflusses von 4,55 Mio. m³ während des Hochwasserzeitraums geschöpft wurde. Die Binnenwasserstände am Schütz hängen daher weitgehend vom Betrieb des Schöpfwerks ab, das in Abhängigkeit von den Wasserständen am Betriebspegel 4 Walle und eingestellten Betriebsregeln aktiviert wird.

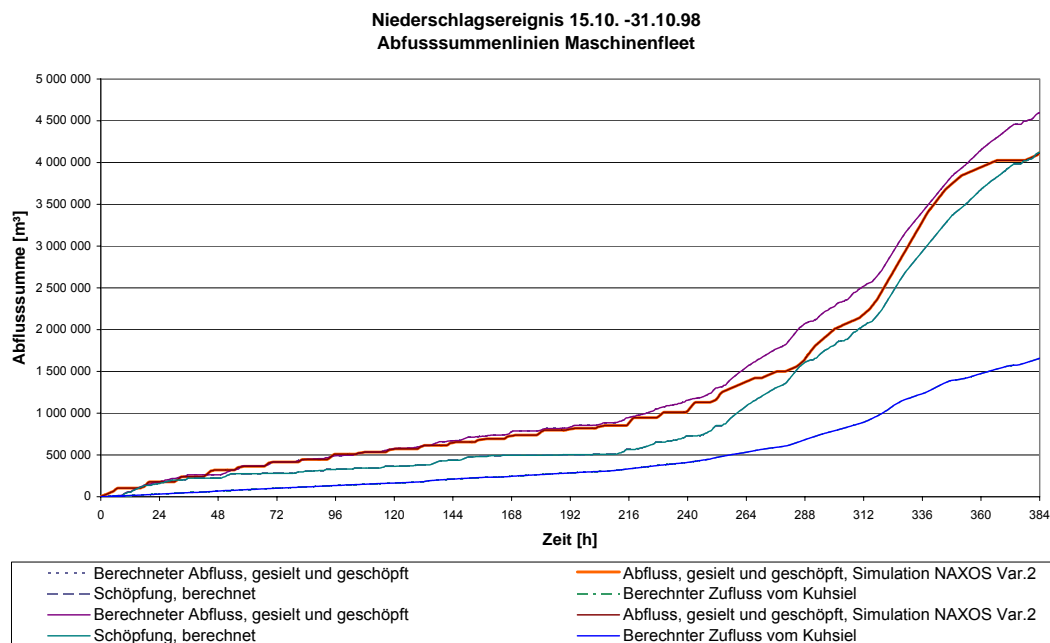


Abb. 6.4.1 Summenlinien der berechneten und mit NAXOS in Variante 2 simulierten Abflüsse aus Wasserhorst und Zuflüsse vom Kuhsiel

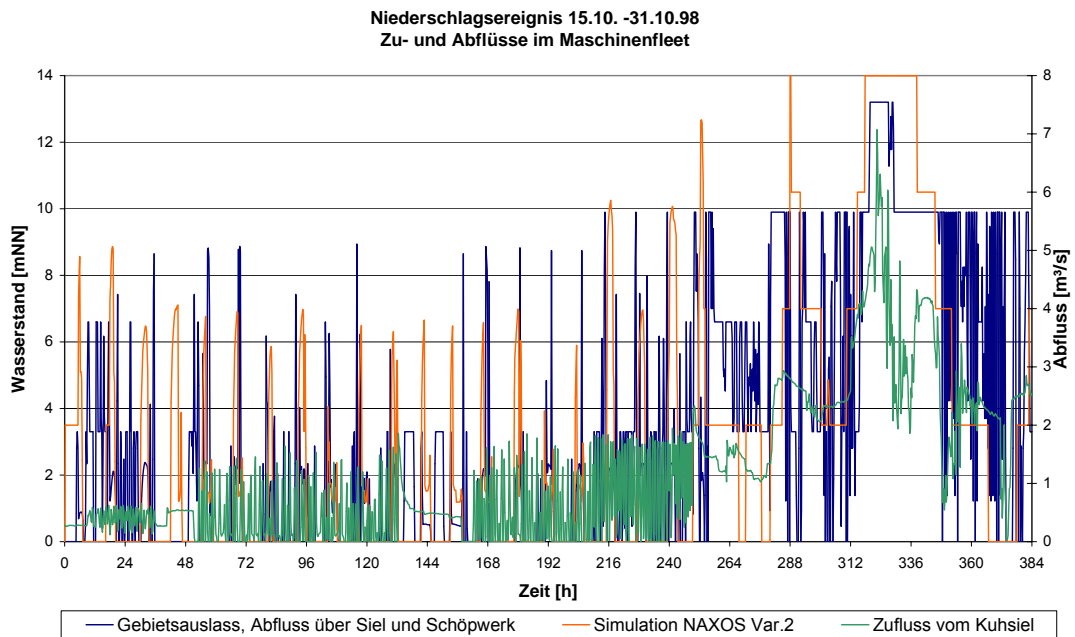


Abb. 6.4.2 Mit Überfallformeln berechnete Zu- und Abflüsse des Hauptsieltiefs und von NAXOS in Variante 2 simulierte gesielte und geschöpfte Abflüsse

Sind alle Wasserhaushaltsgrößen und Grabenstauräume richtig bestimmt, sollten die simulierten Betriebszeiten und Schöpfungen mit den gemessenen Größen übereinstimmen. Ist dies nicht der Fall, kann die Ursache auf Fehleinschätzungen des Niederschlags und damit des Landflächenabflusses, fehlerhaft abgeschätzte Grabenstauräume oder auf manuell eingestellte Betriebsregeln beruhen, die von den mittleren Betriebsregeln abweichen.

Pegel 2 Wasserhorst Binnenpeil (Abb. 6.4.3)

Der Binnenwasserstand am Schütz Wasserhorst wird vom HN-Modell mit einer Abweichung von im Mittel $W_m = 5,3$ cm simuliert, der Korrelationskoeffizient beträgt $r = 0,92$. Die beobachteten Binnentideniedrigwasserstände (BTnw) bei den Markierungen 1 werden richtig nachgebildet. Die simulierten Wasserstände weichen teilweise um mehr als 10 cm ab (z. B. Markierungen 2 und 6). Ab Markierung 3 werden die vom HN-Modell berechneten Wasserstände trotz der vorgegebenen Hubtorstellungen und Schöpfungen nahezu durchgehend zwischen 10 cm und 30 cm zu hoch simuliert.

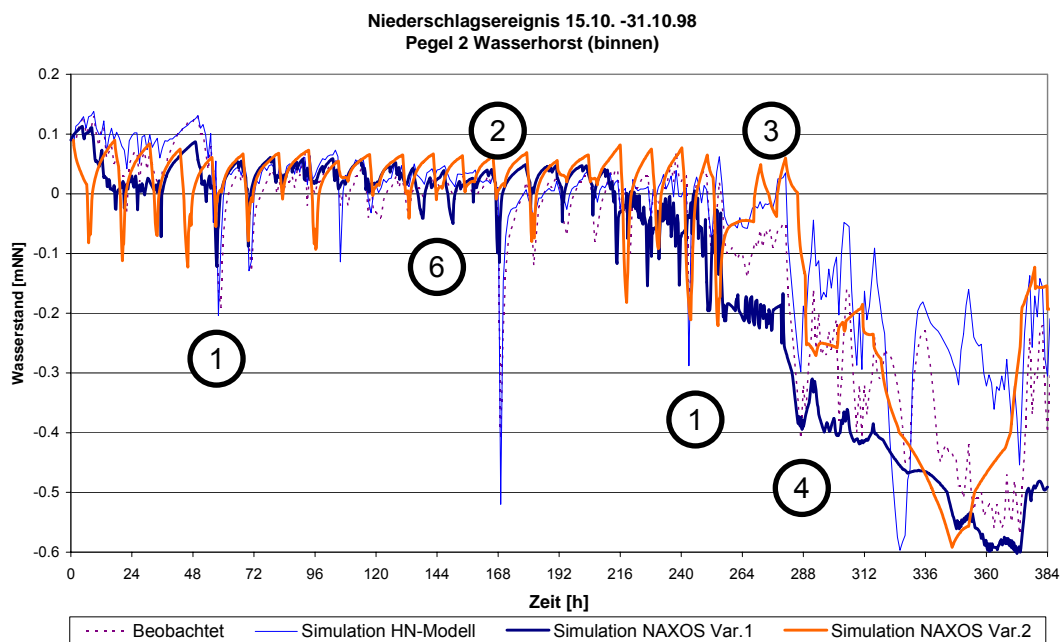


Abb. 6.4.3 Vergleich der beobachteten und simulierten Binnenwasserstände von HN-Modell und NAXOS mit den Varianten 1 und 2 am Pegel 2 Wasserhorst

NAXOS simuliert die Wasserstände am Pegel 2 mit Variante 1 mit $r = 0,96$, W_m ist mit 4,4 cm gering. Bis Markierung 3 weichen die von NAXOS simulierten Wasserstände stärker als die vom HN-Modell von den Beobachtungen ab, danach weniger. Schnelle Wasserstandsänderungen wie das Absinken um ca. 0,4 m binnen 15 Minuten bei Markierung 2 werden von NAXOS mit geringerer Absenkung bzw. mit geringeren Schwankungen simuliert. Dies ist auch nach Absenkung der Sollwasserstände ab Markierung 3 festzustellen, wo vom Kuhsiel Zuflüsse zwischen $2 \text{ m}^3/\text{s}$ und $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$ bei gleichzeitigem Betrieb des Schöpfwerks Wasserhorst zu Wasserstandsschwankungen führen. Die Berechnung der Kreuzkorrelation zeigt, dass eine Verschiebung der beobachteten Wasserstände gegen die mit NAXOS simulierten Wasserstände nicht zu höheren Übereinstimmungen führt, d. h. der Gang der Wasserstände wird von NAXOS ohne systematische Verzögerungen simuliert.

Bei der Simulation mit NAXOS mit Variante 2 verringert sich die Übereinstimmung mit $r = 0,886$ und $W_m = 6,6 \text{ cm}$. Bei den Markierungen 1 und 6 sind die simulierten Wasserstände zeitlich etwas verschoben, jedoch überschreiten die Abweichungen 6 cm bei Markierung 6 nicht. Die Verschiebung ist auf die simulierten Zeitpunkte des Schöpfwerkbetriebs zurückzuführen, die von den

simulierten Wasserständen am Betriebspegel Walle abhängen. Bei simulierten Wasserständen, die am unteren Schwellwert der Betriebsregel nur 1 cm von den beobachteten abweichen, wird der Schöpfwerksbetrieb nicht zeitgleich mit den Beobachtungen simuliert. Nach der Absenkung der Sollwasserstände ab Markierung 3 weisen die simulierten Wasserstände der Varianten 1 und 2 einen unterschiedlichen Gang auf, weil die geschöpften Abflüsse in Variante 2 nicht mit den Schöpfungen in Variante 1 übereinstimmen. Die Betriebsregeln für das Schöpfwerk wurden innerhalb der vom Betreiber vorgegeben Schwankungsbreite für die Simulation des Kalenderjahres 1998 angepasst. Bei der Variante 2 regeln sich daher beim Hochwasser die Wasserstände auf das Wasserstandsniveau ein, das durch die mittleren Betriebsregeln vorgegeben wird.

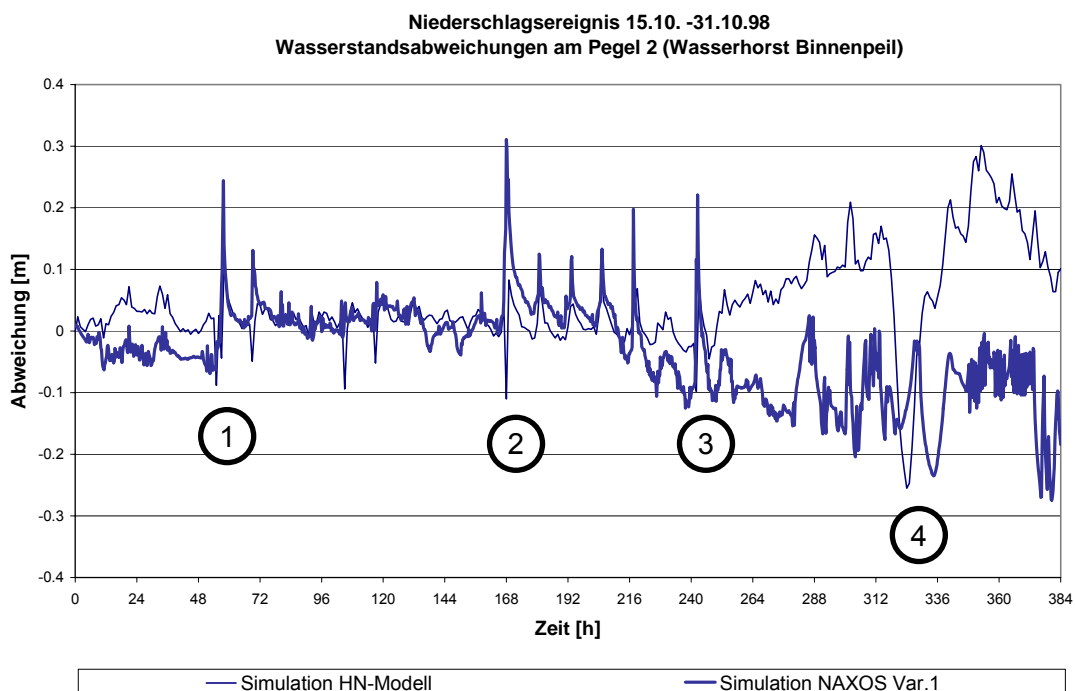


Abb. 6.4.4 Abweichungen der simulierten von beobachteten Wasserständen am Pegel 2 Wasserhorst (Binnenpeil)

Die vom FGM mit Variante 1 simulierten Wasserstände weichen am Pegel 2 häufig weniger als die vom HN-Modell berechneten (Abb. 6.4.4) ab, jedoch wird die mittlere Wasserstandsabweichung durch die vom FGM nicht nachgebildeten einzelnen raschen Wasserstandsänderungen (Markierungen 1 - 3 in Abb. 6.4.4) verschlechtert. Nach der Absenkung der Sollwasserstände ab

Intervall 264 sind die Wasserstandsabweichungen des FGM etwas geringer als die des HN-Modells.

Pegel 3 Ritterhuder Heerstraße (Abb. 6.4.5)

Am Pegel 3 simuliert das HN-Modell die Wasserstände mit $r = 0,94$ und $W_b = 4,5$ cm. Nur wenige lokale Wasserstandsminima werden genau nachgebildet. Die simulierten Wasserstände geben bis Markierung 3 die Binnentidehochwasserstände (BThw) gut wieder, jedoch sind die simulierten BTnw zwischen 2 und 10 cm zu hoch. Bei mehr als der Hälfte aller BTnw ist die Abweichung größer als 5 cm. Nach der Absenkung des Sollwasserstandes ab Markierung 3 betragen die Abweichungen zwischen 5 und 15 cm, wobei die simulierten Wasserstände fast durchgehend zu hoch sind.

Mit NAXOS wird in Variante 1 eine gute Übereinstimmung mit $r = 0,936$ erzielt. Die Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten BThw ist bis Markierung 3 nicht größer als 6 cm. Die simulierte Wasserstandsganglinie ist insgesamt etwas überdämpft. Bei den BTnw betragen die Abweichungen maximal 20 cm an der Markierung 2, sonst bis zu 9 cm. Nach der Absenkung des Meliorationswasserstandes bei Markierung 3 wird der beobachtete Gang deutlich überdämpft, jedoch im Verlauf richtig nachgebildet, die Abweichungen überschreiten 11 cm nicht. Ab Markierung 3 ist die mittlere Wasserstandsabweichung etwas geringer als beim HN-Modell.

Mit Variante 2 erfolgt die Simulation mit NAXOS mit $r = 0,904$ und $B_w = 5,5$ cm. Wie bei Pegel 2 sind die Wasserstände aufgrund simulierten Schöpfwerkbetriebs teilweise verschoben, jedoch wird die überwiegende Anzahl der schöpfungsbedingten Wasserstandsabsenkungen gut nachgebildet. Der berechnete Wasserstand liegt nahezu im gesamten Simulationszeitraum zu hoch.

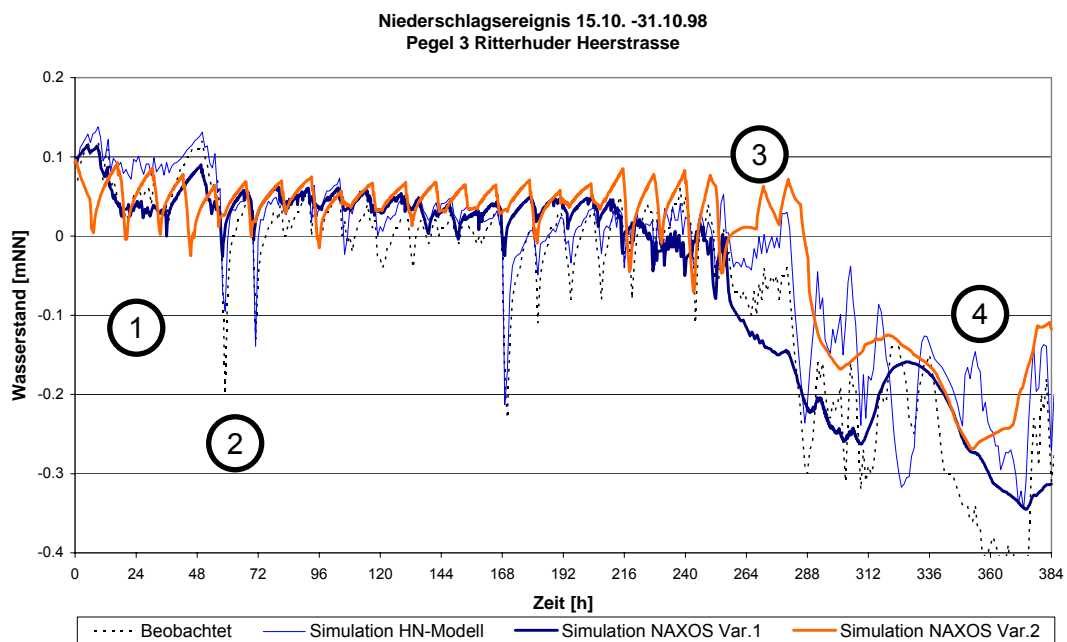


Abb. 6.4.5 Vergleich der simulierten Wasserstände von NAXOS und ISIS mit beobachteten Wasserständen am Pegel 3 Ritterhuder Heerstraße

Pegel 4 Walle MVA (Abb. 6.4.6)

Das HN-Modell kann mit den vorgegeben oberen Randbedingungen (vorgegebene Binnenwasserstände in einer Entfernung von 400 m) die beobachteten Wasserstände des Pegels 4 (Abb. 6.4.6) mit $B_w = 1,6$ cm und $r = 0,94$ gut nachbilden, die Abweichungen überschreiten 10 cm nicht.

Mit NAXOS erfolgt die Simulation mit Variante 1 mit $r = 0,887$ und $B_w = 2,7$ cm. Beim N-A-Modell liegt keine Wasserstandsganglinie als obere Randbedingung vor. Die simulierten Wasserstände weisen wie bei Pegel 3 einen gedämpften Gang auf und haben bei den meisten Sielzügen eine zu geringe Amplitude, aber die Abweichungen überschreiten 10 cm nur an Markierung 2. Der Wasserstandsgang nach der Absenkung des Meliorationswasserstandes ab Markierung 3 wird ebenfalls überdämpft, aber im Mittel gut nachgebildet. Der BThw von 0,2 mNN bei Markierung 4 wird nahezu genau simuliert, der BTnw bei Markierung 5 dagegen um 8 cm zu hoch simuliert. Die mittleren Abweichungen sind geringer als beim HN-Modell.

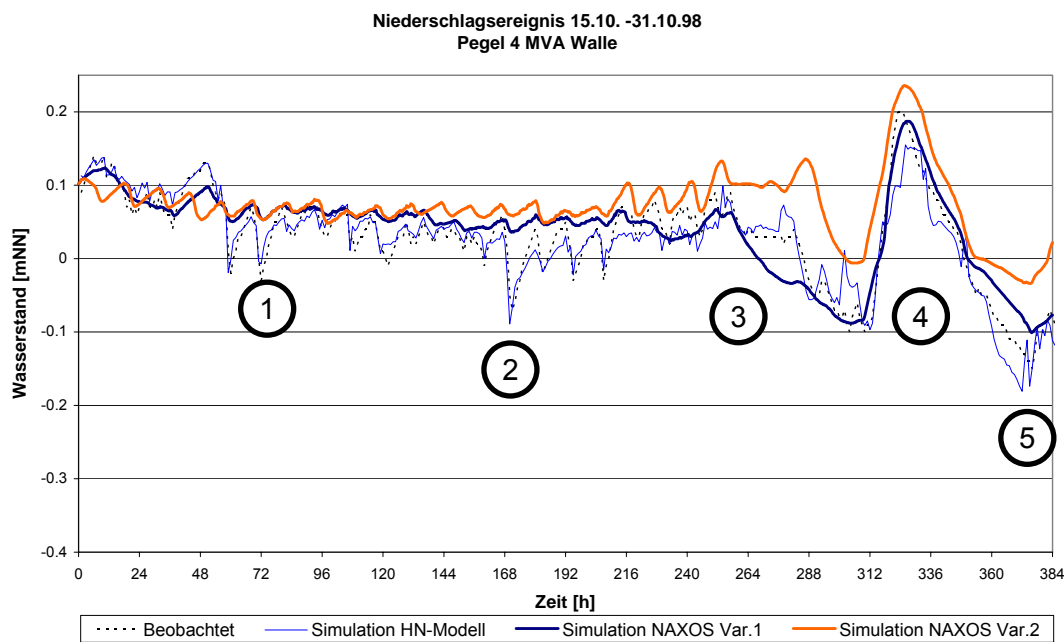


Abb. 6.4.6 Vergleich der simulierten Wasserstände von NAXOS und ISIS mit gemessenen Wasserständen am Pegel 4 MVA Walle

Mit Variante 2 sind $r = 0,732$ und $B_w = 4,3$ cm. Die berechneten Wasserstände sind wie bei den Pegeln 2 und 3 aufgrund der mittleren Betriebsregeln über nahezu den gesamten Zeitraum zu hoch. Die simulierte Wasserstandsganglinie ist überdämpft, das beobachtete Wasserstandsminimum bei Markierung 5 wird um 15 cm zu hoch simuliert. Die Zeitpunkte der meisten Wasserstandsanstiege und -absenkungen werden richtig nachgebildet. Zwischen den Markierungen 3 und 4 wird die beobachtete Ganglinie mit mittleren Abweichungen von ca. 6 cm besser nachgebildet als mit Variante 1.

6.5 Sensitivitätsanalyse

Die Unsicherheit bei der Bestimmung einzelner Kennwerte und Modellparameter sowie ihr Einfluss auf die Simulationsergebnisse soll analysiert werden. Bei Flussgebietsmodellen ist, verglichen mit der einfachen Erfassung geometrischer Größen wie Flächengröße und Fließlänge, die Bestimmung der Parameter für den Abfluss von der Landoberfläche schwieriger. Die Parameter Bodengruppe und Flächengefälle sind abhängig vom Maßstab der Eingangsdaten und sollen im Folgenden ebenso variiert werden.

Der Anfangswasserstand im Grabensystem für den Kettenspeicheransatz und der Rauheitsbeiwert nach Strickler sollen ebenfalls variiert werden.

Die Bestimmung des Gebietsniederschlags aus Stationsmessungen, bei denen der auf die Messfläche einer Station gefallene Niederschlag um mehrere Zehnerpotenzen als Gebietsniederschlag extrapoliert wird, ist die unsicherste Größe bei der Niederschlag-Abfluss-Simulation, wenn nicht flächendeckende Messwerte aus Radarmessungen verwendet werden können.

Als Referenzen für die Sensitivitätsanalyse werden die Varianten 1 und 2 des FGM herangezogen. Die Veränderungen sollen derart durchgeführt werden, dass eine ca. zehnprozentige Variation bezogen auf die Größenordnung der Ausgangswerte erreicht wird.

Die Sensitivitätsanalyse und die Abweichungsparameter zeigen, dass am Gebietsauslass die Auswirkungen veränderter Parameter, Anfangsbedingungen und Eingangsgrößen nicht eindeutig bessere oder schlechtere Ergebnisse liefern, da Korrelationskoeffizient r und Abweichung nach Nash-Sutcliffe R^2 z. T. gegenteilige Aussagen über eine Verbesserung oder Verschlechterung einer Rechenvariante machen.

Da bei der Variante 1 die Abflüsse vorgegeben werden, muss der bilanzierte Wasserstand Aufschluss über die Veränderungen geben. Bei dem kurzen Untersuchungszeitraum von 16 Tagen wirkt sich die Änderung des Anfangswasserstandes mit Abstand am deutlichsten auf die Güte der Berechnung aus, da bei vorgegebenem Abfluss und berechnetem Zufluss über die Simulationsdauer ein zu geringer Speicherinhalt berechnet wird. Die Erhöhung der Niederschläge um 10 % führt zur zweitgrößten statistischen Abweichung, wodurch der wesentliche Einfluss der richtigen Berechnung des Gebietsniederschlags und Landflächenabflusses auf die Abflussberechnung gezeigt wird. Die weiteren Änderungen wirken sich in der Statistik nur gering aus und müssen visuell bewertet werden.

Bei Variante 2 mit Abflusssimulation anhand von Betriebsregeln führt die Mittelung des Niederschlags von 5-Minuten-Ablesungen auf Tagesmittelwerte zu der größten Abweichung beim Wasserstand. Eine Erhöhung des Niederschlags führt dagegen zur Verbesserung des Korrelationskoeffizienten r beim Abfluss, gleichzeitig verschlechtert sich r beim Wasserstand. Auch bei dieser Modellvariante wird der wesentliche Einfluss des Landflächenab-

flusses in Abhängigkeit vom Niederschlag verdeutlicht. Der Einfluss des veränderten Niederschlags auf die Wasserstandsganglinie kann in Abb. 6.5.1 am Pegel Walle gezeigt werden. Der reduzierte Anfangswasserstand wirkt sich durch die selbstständige Wasserstandsregelung von NAXOS geringer auf die Abweichungsparameter aus als bei Variante 1, weil das fehlende Grabenvolumen durch verringerte Abflüsse kompensiert und sogar eine Verbesserung der Übereinstimmung beim Abfluss erreicht wird.

Tab. 6.5.1 Varianten und Abweichungsparameter am Gebietsauslass

Korrelationskoeffizient $r(W)$ für Wasserstände, $r(Q)$ für Abflüsse, Abweichung nach Nash-Sutcliffe R^2 und mittlere Abweichung der simulierten von beobachteten Wasserständen

Variante und Veränderung	$r(W)$	$r(Q)$	$R^2(Q)$	Mittl. Abweichung (W) [cm]
1 ohne Veränderung	0,956	-	-	4,4
1 Niederschlag als Tageswert	0,954	-	-	4,5
1 Niederschlag + 10 %	0,928	-	-	6,3
1 Verdoppelung des Gebietsgefälles	0,960	-	-	4,3
1 Erhöhung der SCS-Bodengruppe um 1/4	0,957	-	-	4,9
1 Erhöhung Rauheitsbeiwert um 3	0,960	-	-	4,7
1 Absenkung des Anfangswasserstandes um 10 cm	0,854	-	-	18,2
2 ohne Veränderung	0,911	0,732	0,169	6,6
2 Niederschlag als Tageswert	0,886	0,732	0,168	7,3
2 Niederschlag + 10 %	0,919	0,753	0,148	7,0
2 Verdoppelung des Gebietsgefälles	0,913	0,738	0,165	6,6
2 Erhöhung der SCS-Bodengruppe um 1/4	0,913	0,743	0,160	6,6
2 Erhöhung Rauheitsbeiwert um 3	0,891	0,724	0,178	6,4
2 Absenkung des Anfangswasserstandes um 10 cm	0,900	0,754	0,167	6,9

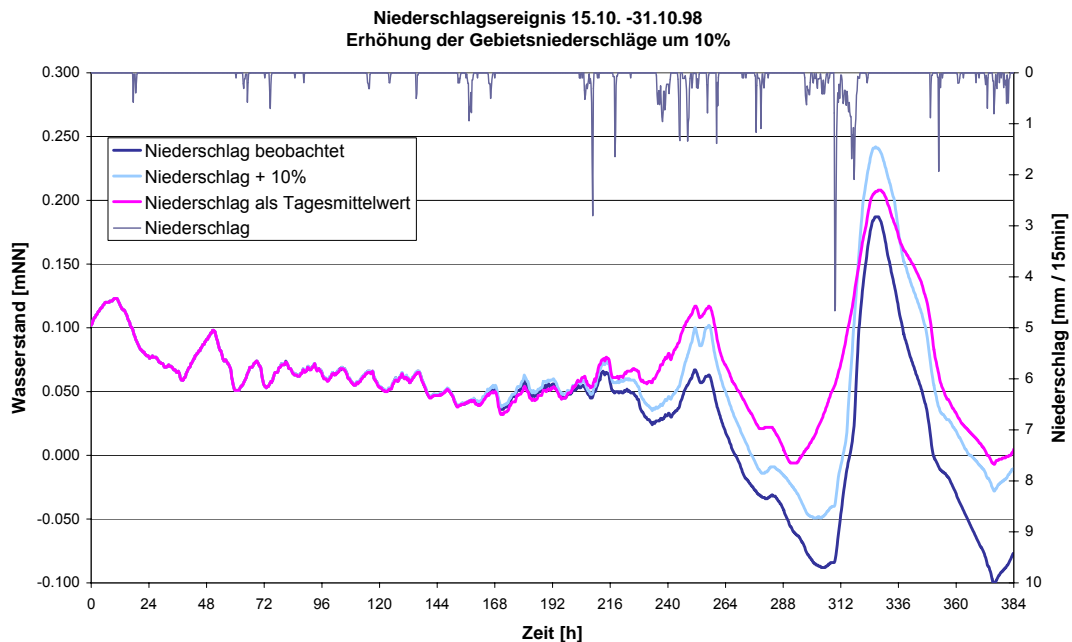


Abb. 6.5.1 Mit NAXOS in Variante 1 am Pegel Walle berechneter Wasserstand bei beobachteten und veränderten Niederschlägen

6.6 Bewertung der Varianten

Die mit NAXOS berechneten Wasserstände können die beobachteten Wasserstandsganglinien in beiden Varianten weitgehend nachbilden, jedoch sind die vom FGM simulierten Wasserstandsschwankungen bei den meisten Sielzügen etwas gedämpfter als beim HN-Modell. Extreme und kurzzeitige Wasserstandsabsenkungen wie z. B. am Schütz am 22.10.1998 (Abb. 6.3.4, Intervall 168), wo das Binnenpeil binnen einer Stunde um 59 cm abfällt und in der nächsten Stunde um 38 cm wieder ansteigt, können mit dem FGM in der vorliegenden räumlichen und zeitlichen Auflösung nicht so detailliert wie mit dem HN-Modell nachgebildet werden.

Das sich nach einem Sielzug oder einer Schöpfung einstellende Binnenpeil am Schütz ist vom Wasserstand zu Beginn der Schöpfung, vom geschöpften Volumen, dem Zufluss und dem Speicherinhalt des Grabenstauraums abhängig. Die überwiegende Anzahl von Tidezyklen bis Intervall 264 wird hinsichtlich des Sielzugfalls, also der Wasserstandsdifferenz zwischen aufeinander folgenden BTnw und BThw, vom FGM in beiden Varianten mit

Abweichungen von wenigen cm gut simuliert. Die Wasserstandsabweichungen bei der Variante 1, bei der die Abflüsse vorgegeben sind, werden auf Ungenauigkeiten im FGM gegenüber der realen Situation zurückgeführt. Diese Ungenauigkeiten liegen in der Berechnung des Gebietsniederschlags und damit der Landflächenabflüsse. Bei einer Überschätzung z. B. des Gebietsniederschlags um 10 % führt dies mit dem FGM in Variante 1 bei vorgegebenen Gebietsabflüssen zu einer Anhebung der berechneten Wasserstände um bis zu 11 cm am Ende der Simulationsdauer (Abb. 6.5.1) und die mittlere Abweichung zu den beobachteten Wasserständen steigt um 2,5 cm an. Am Gebietsauslass sind die Abweichungen größer. Die Fehler bei der Wasserstandsberechnung, die durch eine zehnprozentige Fehleinschätzung des Landflächenabflusses vom FGM auftreten, sind größer als die Abweichungen zwischen FGM und HN-Modell, die im Mittel einen Betrag von 2 cm nicht überschreiten. Eine Mittelung der Niederschläge von 5-Minuten-Ablesungen auf Tageswerte führt durch die veränderten Landflächenabflüsse zu zusätzlichen Abweichungen der simulierten Wasserstandsganglinie.

Nach der Umstellung der Betriebsregeln und der Absenkung des Sollwasserstandes ab 26.10.1991 bzw. Intervall 264 folgen die berechneten Wasserstände am Gebietsauslass bei Variante 1 dem beobachteten Verlauf gedämpft, das beobachtete Wasserstandsminimum wird vom FGM nachgebildet. Bei der Variante 2 werden am Gebietsauslass mittlere Wasserstandsabweichung von weniger als 7 cm, die nur vereinzelt 10 cm überschreiten, als sehr gutes Ergebnis für ein Flussgebiet von rd. 100 km² Einzugsgebietsgröße, im Mittel 1 300 m langen Teilflächen im Hauptsieltief und automatisierter, gemittelter Wasserstandsregulierung gewertet. Die mittlere Wasserstandsabweichung ist damit nur geringfügig größer als beim HN-Modell (5 cm). Bis zur Absenkung der Meliorationswasserstände beträgt die mittlere Wasserstandsabweichungen in Variante 2 am Gebietsauslass weniger als 5 cm.

Mit der Variante 1 wurde gezeigt, dass NAXOS den Wasserstand am Gebietsauslass gedämpft, aber bis auf einzelne, sehr rasche Wasserstandsabsenkungen während des Hochwassers richtig wiedergibt und dass die Berechnung des Grabenstauraums und des Landflächenabflusses insgesamt stimmig sind.

Die Ergebnisse der Variante 2 belegen, dass NAXOS während des Hochwassers auch bei wechselnden Betriebsregeln den gesielten Abfluss, die Wasserstände und die Schöpfungen z. T. verzögert, aber in der richtigen Größenordnung simuliert. Der gegenüber den beobachteten Größen bei einigen Sielzügen um einige Stunden versetzte Verlauf der simulierten Abflüsse und Wasserstände ist darauf zurückzuführen, dass die für das N-A-Modell vorgegebenen Betriebsregeln Mittelwerte für das Kalenderjahr 1998 darstellen, die von den tatsächlich angehaltenen Betriebsregeln und Sollwasserständen teilweise abweichen.

Es ist anzumerken, dass die Berechnung des HN-Modells Maschinenfleet mit ISIS auf einem PC mit Pentium 1,4 GHz Prozessor ca. 20 Minuten dauert, wobei die Zuflussganglinien durch z. B. ein N-A-Modell wie NAXOS bereitgestellt werden müssen. Für die Berechnung des Gesamtmodells mit Wümme und Lesum (350 Teilflächen, 2 200 km² Einzugsgebietsgröße, 384 Stunden Simulationszeitraum) benötigt NAXOS auf dem gleichen PC bei einer Rechenschrittweite von 0,25 h dagegen nur ca. 5 Minuten. Mit Ausnahme einer vorzugebenden Wasserstandsganglinie am Auslass des untersten Kettenspeichers werden alle Ganglinien vom Modell selbst berechnet.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Abflusskonzentrationsansatz mit Einzellinearspeichern und Berücksichtigung der Gewässerdichte zur Kompensation des Skaleneinflusses auf die simulierten Abflüsse entwickelt. Die Gewässerdichte bleibt bei Skalenwechseln konstant und wird zur Berechnung der mittleren Hanglänge herangezogen. Die Abflüsse auf der Landoberfläche und im Gerinne werden getrennt simuliert. Die Speicherkonstanten sind abhängig von der Fließzeit auf der Landoberfläche und werden anhand der mittleren Hanglänge und der Fließgeschwindigkeit berechnet. Für die Berechnung der mittleren Hanglänge werden virtuelle Nebengerinne eingeführt, wenn der Quotient aus Hauptgerinnelänge und Flächengröße kleiner ist als die vorgegebene Gewässerdichte. Die mittlere Länge und topologische Anordnung der virtuellen Nebengerinne werden anhand eines empirischen Regelsystems ermittelt. Mit dem Regelsystem wird zusätzlich ein Fließzeit-Flächen-Diagramm berechnet, mit dem der Landflächenabfluss zum Gerinneabfluss transformiert wird. Die mittlere Hanglänge und die Speicherkonstanten sind innerhalb der hydrologischen Mesoskala mit Flächengrößen zwischen ca. 1 und 100 km² praktisch unabhängig von der betrachteten Raumskala, wenn eine homogene Gewässerdichte vorliegt. Die Regionalisierung der Modellparameter vereinfacht sich durch die Reduktion des Skaleneinflusses auf die Rückgangskonstanten des Abflusskonzentrationsansatzes. Für ein synthetisches und ein natürliches Einzugsgebiet mit homogener Gewässerdichte wird aufgezeigt, dass unter Beibehaltung des Parameters Gewässerdichte die mittlere Teileinzugsgröße etwa um den Faktor 5 vergrößert werden kann, ohne dass signifikante Abweichungen bei den simulierten Abflussganglinien und Abflussscheiteln des Gesamteinzugsgebiets auftreten.

Für die Simulation von rückstaubeeinflussten Abflüssen mit Flussgebietsmodellen werden eindimensionale hydrodynamisch-numerische und hydrologische Verfahren verglichen. Auf der Basis des Seeretentionsverfahrens wird vom Verfasser ein als Kettenspeicheransatz bezeichnetes hydrologisches Verfahren entwickelt. Das Gewässernetz eines Teileinzugsgebiets wird in bis zu drei Speicher untergliedert, die den verfügbaren Grabenstau-

raum abbilden und als Kettenspeicher bezeichnet werden. Die Abflusskurven der Kettenspeicher sind zeitinvariant und von den Wasserständen der aneinander grenzenden Kettenspeichern abhängig. Die räumliche Reihenfolge der Abarbeitung der Kettenspeicher folgt der Hauptfließrichtung, d. h. von der Wasserscheide zum Gebietsauslass hin. Bei der Abarbeitung eines Kettenspeichers wird nicht dessen Abfluss, sondern der Zufluss von allen zufließenden Kettenspeichern bei gleichzeitiger Speicherinhaltsbilanzierung berechnet. Für den untersten Kettenspeicher eines Fließabschnitts ist zur Abflussberechnung eine untere Randbedingung in Form einer Abflusskurve oder einer Wasserstandsganglinie vorzugeben. Neben geometrischen Größen wie Länge, Breite und Tiefe der Gewässer ist die Rauheit nach Strickler der einzige Kalibrierungsparameter für den Kettenspeicheransatz, so dass das Verfahren auf andere Flussgebiete leicht übertragbar ist.

Für die Modellanwendung wurden die entwickelten Gleichungen des Kettenspeicheransatzes und die Berechnungsmodule für die Simulation des Abflusses an Schöpfwerk, Siel mit Stemmtor, Hubschütz und Stauklappe in das GIS-basierte N-A-Modell NAXOS integriert. Die Module berücksichtigen die Bauwerksbemessung, Betriebsregeln und unterscheiden Sollwasserstände für Sommer- und Winterbetrieb. Unregelmäßige, manuelle Eingriffe in die Betriebsregeln, die auf zufälligen Entscheidungen vor Ort beruhten und die nachträglich nicht in der Steuerung berücksichtigt wurden, können vom Modell naturgemäß nicht nachgebildet werden. Für die Dauer der Simulation sind mittlere Betriebsregeln vorzugeben. Das Modell NAXOS beinhaltet Funktionen für die Berechnung der Speicherinhaltslinien aus Grabenquerschnitten und der Topografie, wodurch die Parametrisierung erleichtert wird.

Die Modellanwendung erfolgt auf zwei tidebeeinflusste Einzugsgebiete an der Unterweser, das Flussgebietsmodell (FGM) Käseburger Sieltief mit 72 km² und das FGM Lesum mit 2 200 km². Im FGM Lesum wird die Simulation für ein engeres Untersuchungsgebiet von ca. 100 km² gezeigt. Die Eignung der entwickelten Ansätze für die Simulation des Wasserhaushaltes und des Abflusses aus Sielen mit Wasserstandsregelung wird mittels Langfristsimulationen über mehrere Monate für beide Untersuchungsgebiete aufgezeigt. Für die Verifizierung der Simulationsergebnisse werden Abflüsse herangezogen, die anhand von Wasserstandsaufzeichnungen und Fließformeln berechnet sind.

Für die Simulationen wird die mittlere Jahresverdunstung vorgegeben. Die mit NAXOS simulierten gesielten und geschöpften Abflüsse entsprechen in der Summe nahezu den berechneten Abflüssen, der Wasserhaushalt wird bei Starkregen und über mehrere Monate gut nachgebildet. Die geschöpften Abflüsse umfassen im Untersuchungszeitraum beim Käseburger Siel weniger als 2 % des Gebietsabflusses, im engeren Untersuchungsgebiet der Lesum betragen sie nahezu 60 % des Gebietsabflusses. Die simulierten Zeitpunkte der Schöpfungen weichen teilweise von den aufgezeichneten Zeitpunkten ab, weil die Simulation der Schöpfwerke im FGM mit mittleren Betriebsregeln für jeweils Sommer- und Winterbetrieb durchgeführt wird. Im Einzugsgebiet der Lesum werden jedoch die Sollwasserstände durch den Betreiber häufig kurzzeitig verändert. Wenn die Sollwasserstände den mittleren Betriebsregeln entsprechen, können die beobachteten Binnenwasserstände an den Sielen mit NAXOS mit geringen Abweichungen von wenigen Zentimetern simuliert werden. Im Binnenland entsprechen die simulierten Wasserstände weitgehend dem mittleren Verlauf der beobachteten Wasserstände. Nach Sielzügen und Schöpfungen sind die simulierten Wasserstandsschwankungen z. T. geringer als die beobachteten.

Für ein ca. 10 km langes Hauptsieltief im Unterlauf des Untersuchungsgebiets Lesum wurde zum Vergleich ein eindimensionales, hydraulisch-numerisches (HN-) Modell für das Hauptsieltief erstellt. Beide Modelle werden auf ein Hochwasserereignis angewendet. Die vom N-A-Modell simulierten regenbürtigen Abflüsse werden an 19 Querschnitten zwischen Grabensystem und Hauptsieltief als Zuflussganglinien bereitgestellt. Diese 19 Zuflussganglinien bilden zusammen mit einer Außenwasserstandsganglinie am unteren und einer Binnenwasserstandsganglinie am oberen Modellrand sowie Zuflüssen aus einem anderen Sieleinzugsgebiet die Randbedingungen für das HN-Modell. Bei der Kalibrierung des HN-Modells wurden das Binnenpeil am unteren Modellrand und zusätzlich die Schöpfungen als untere Randbedingung vorgegeben.

Bei den Vergleichsrechnungen wurden zwei Varianten des FGM mit verschiedenen unteren Randbedingungen eingesetzt. Obere Wasserstandsrandbedingungen werden beim FGM nicht vorgegeben. In der Variante 1 werden durch Vorgabe der Schöpfungen und Außenwasserstände untere Randbedingungen eingestellt, die auch beim HN-Modell vorgegeben werden. In der Variante 2 simuliert NAXOS gesielte und geschöpfte Abflüsse und

Wasserstände anhand der Außenwasserstände und mittlerer Betriebsregeln für Siel und Schöpfwerk selbstständig. Mit beiden Varianten kann das FGM Lesum bei einer Rechenschrittweite von 15 Minuten die beobachteten Wasserstände mit mittleren Abweichungen von nur wenigen Zentimetern nachbilden. Bei der Variante 2 sind die Wasserstandsabweichungen am Gebietsauslass im Mittel ca. 1 cm größer als bei den vorgegebenen Abflüssen der Variante 1.

Variante 1 belegt, dass NAXOS den Landflächenabfluss bei Starkregen gut und die Wasserstandsschwankungen bei Sielzug am Gebietsauslass etwas gedämpft, aber mit Ausnahme sehr rasch fallender Wasserstandsabsenkungen mit mittleren Abweichungen von nur 4,4 cm simuliert. Die Absenkung der Sollwasserstände während des Hochwassers kann vom FGM im Mittel besser nachgebildet werden. Beim HN-Modell betragen die mittleren Wasserstandsabweichungen 5,3 cm. Der Korrelationskoeffizient zwischen simulierten und beobachteten Wasserständen ist beim HN-Modell mit $r = 0,91$ schlechter als beim FGM mit $r = 0,96$. Eine Sensitivitätsanalyse mit dem FGM zeigt, dass bei der Simulation der Landflächenabflüsse die Variationen des Niederschlags zu größeren Abweichungen als Variationen der Sohlrauheit für das Grabensystem führen. Die Sensitivitätsanalyse mit dem HN-Modell war problematisch, weil bei veränderten Zuflüssen und Sohlrauheiten die Simulation meist durch Programmabbruch beendet wurde.

Mit Variante 2 wird gezeigt, dass NAXOS während des Hochwassers die Wasserstände und den Schöpfwerksbetrieb mit Berücksichtigung der Umstellung auf Winterbetrieb in der richtigen Größenordnung simuliert. Aufgrund wechselnder Betriebsregeln für das Schöpfwerk innerhalb des Simulationszeitraums weichen die aufgezeichneten und vom FGM simulierten Zeiträume des Schöpfwerksbetriebs teilweise voneinander ab. Das HN-Modell bildet rasch steigende und fallende Wasserstände besser als das FGM bei beiden Varianten nach, jedoch steigen beim HN-Modell mit einsetzendem Starkregen die Wasserstandsabweichungen an und sind häufig größer als die Wasserstandsabweichungen des FGM.

Mit den Flussgebietsmodellen Käseburger Sieltief und Lesum wird gezeigt, dass mit den vorgestellten Ansätzen der Wasserhaushalt und der Abfluss für Flusseinzugsgebiete mit komplexer, wasserstandsgeregelter Entwässerung durchgeführt werden können. Die hohe Rechengeschwindigkeit und leichte Parametrisierbarkeit der gewässerspezifischen Modellparameter ermöglichen

einen operationellen Einsatz des Modells selbst bei Flussgebieten größer 1 000 km². Durch die Berücksichtigung der Gewässerdichte wird die gebiets- und skalenbedingte Streuung der Größe der konzeptionellen Speicherkonstanten bei der Abflusskonzentration minimiert. Mit dem modifizierten SCS-Verfahren kann der Wasserhaushalt bei vorgegebener aktueller Verdunstung auch bei Langfristsimulationen eingesetzt werden.

8 Literaturverzeichnis

- Ammer, M.; Rösl, G. (1995): Optimierung einer Hochwasserschutzmaßnahme mit Hilfe eines numerischen Fließgewässermodells. In: Wasserwirtschaft 85 (10/1995)
- BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (1997): Stand und Einsatz mathematisch-numerischer Modelle in der Wasserwirtschaft. Bonn
- Bolrich, G. et al. (1989): Technische Hydromechanik, Bd. 2., 2. Aufl.
- Bolrich, G.; Preissler, G. (1992): Technische Hydromechanik, Bd. 1., 3. Aufl.
- Bremischer Deichband a. r. W. (1999): Beschreibung der Schöpfwerke und Siele im Einzugsgebiet der Lesum. Schriftliche Mitteilung, unveröffentlicht.
- Brinkmann, B., Thieleke, S. (2003): Leistungsermittlung von Sielbauwerken. In: Wasserbau 1-2, S. 45ff
- BFG Bundesanstalt für Gewässerkunde (1999): Mathematische Modelle in der Gewässerkunde. Stand und Perspektiven. Beiträge zum Kolloquium am 15./16.11.1998 in Koblenz. H. 19, Berlin
- CHR/KHR (Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets) (2001): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. Bericht I-19
- De Halleux, J. (2002): An C++ implementation of Douglas-Peucker Line Approximation Algorithm.
<http://www.codeproject.com/useritems/dphull.asp>
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (1979): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland. Textband. Bonn
- DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft; Kleeberg, H.-B. (Hrsg) (1992): Regionalisierung in der Hydrologie. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung. Weinheim
- Deutscher Wetterdienst (1990): Verzeichnis der Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik Deutschland.

- Deutscher Wetterdienst (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland KOSTRA.
- DIN 1184 Schöpfwerke. Grundlagen und Richtlinien für die Planung. Köln, 1963
- Douglas, D. H.; Peucker, T. K. (1973). Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a line or its caricature. The Canadian Cartographer, 102, S. 112-122
- DVWK (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft 113. Hamburg
- DVWK (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 220. Hamburg und Berlin
- Dyck, S. (1980): Angewandte Hydrologie. Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flußgebiete, 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen
- Dyck, S.; Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. Auflage. Berlin
- Garbrecht, J.; Martz, L. (1993): Case Application of the Automated Extraction of Drainage Network and Subwatershed Characteristics from Digital Elevation Models by DEDNM. Geographic Information Systems and Water Resources, American Water Resources Association
- Haestad (2003): Pondpack. <http://www.haestad.com/software/pondpack>
- Haider, S. (1994): Der Beitrag von Vorlandüberflutungen zur Verformung von Hochwasserwellen. Mitt. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich 128 (1994)
- Halcrow Group Ltd. (1999a): Isis Flow User Manual. Vol. 1 User Guide
- Halcrow Group Ltd. (1999b): Isis Flow User Manual. Vol. 2 Hydraulic Units
- Hölzemann, S. (2000): Berechnung der veränderten Abflussbildung bei der Flächenentsiegelung mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell. Studienarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig. Unveröffentlicht.
- Hydrographische Karte Niedersachsen. Der Niedersächsische Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.) (1983). Karten 1:50 000 und Flächenverzeichnis. Hannover

- Kinzelbach, W.; Bühler, J. (2003): Vorlesungsscript Hydraulik.
<http://www.ihw.ethz.ch/lehre/hydraulik1>
- Kleeberg, H. B.; Øverland, H. (1992): Möglichkeiten der Abflussmodellierung unter Nutzung von Geoinformationssystemen. Neubiberg
- Köhler, G. (1977): Hydrologie der Oberflächengewässer im Küstenbereich unter dem Einfluss der Tide. In: Mitt. des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der TU Hannover, Heft 42
- Kölla, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung (Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 87). Zürich
- Kölla, E. (1987): Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz. In: Schweizer Ingenieur und Architekt 33-34, S. 965-972
- Kirpich, Z. P. (1940): Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Engineering 10 (1940)
- Kunz, H. (1975): Wasserhaushaltsberechnungen in tidebeeinflussten Gebieten. In: Mitt. des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der TU Hannover, Heft 35
- Liese, R.; Luck, G. (1973): Ermittlung der Abflussspenden im Küstengebiet. Jahresbericht 1972 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Band 24, Norderney
- Lutz, W. (1984): Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen, Diss. am Inst. Hydrologie und Wasserwirtschaft, H.24, Universität Karlsruhe
- Maniak, U. (1997): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Bauingenieure. 4. Aufl. 1997
- Maniak, U.; Riedel, G. (1998): Ableitung und Regionalisierung von Laufzeit und Speicherfunktion für direkte Abflusskomponenten aus direkt beobachtbaren geographischen Informationen. Forschungsbericht DFG-Forschungsprojekt Regionalisierung in der Hydrologie Ma-509

- Maniak, U.; Weihrauch, A.; Riedel, G. (1999): Wasserwirtschaftliche Simulation in der Kulturlandschaft Unterwesermarsch. In: Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, H.35, S. 65-86
- Maniak, U.; Weihrauch, A.; Riedel, G. (2000): Flußgebietsmodell für den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet des Weserästuars. Teilprojekt „Wasserwirtschaft“ des Verbundprojektes „Klimaänderung und Unterweserregion - Fallstudie Weserästuar“ im Forschungsschwerpunkt „Klimaänderung und Küste“ BMBF, 01-LK-9696/3
- Mehlhorn, G. (Hrsg.) (1995): Der Ingenieurbau. Grundwissen. Berlin
- Messal, H. (2000): Rückkopplungen und Rückwirkungen in der hydrologischen Modellierung am Beispiel von kontinuierlichen Niederschlag-Abfluss-Simulationen und Hochwasservorhersagen. Dissertation an der TU Berlin
- Meyer, U., Dohme, C., Baur, R., Augustin, T.: Siele und Sieldurchlässe im Bereich der Wesermarsch zwischen Rekum und Bremerhaven. Studienarbeit, Universität Bremen. Ohne Jahresangabe
- Meyer, W. (1983): Entwicklung einer geeigneten Sielzugformel zur Berechnung von Sielzugmengen. In: Wasser und Boden 35, H.3
- Maurer, T. (1997): Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. Karlsruhe
- Mücke, D.; Riedel, G. (2000): LWI-Tools. Extension für das GIS ArcView. Unveröffentlicht
- Niedersächsischer Umweltminister (Hrsg.) (1990): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Jade - Unterweser (Entwurf)
- Niedersächsischer Umweltminister (Hrsg.) (1994): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Wümme - Unterweser
- Niedersächsisches Umweltministerium (2003): Das geographische Informationssystem Umwelt (GEOSUM) des Landes Niedersachsen - Datenbestand und Datenabgabe
http://www.mu.niedersachsen.de/GEOSUM/geosum_konzept.html
- Patt, H. (2001): Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. Berlin. Springer Verlag

- Riedel, G.; Maniak, U. (1999): Regionalization of parameters for direct runoff. In: Diekkrüger et al. (Hrsg.): Regionalization in Hydrology. IAHS Publication 254
- Riedel, G. (2003): Niederschlag-Abfluss-Modell NAXOS. Handbuch. Unveröffentlicht
- Rother, K.-H. (1974): Der Einfluss von Veränderungen im Abflusssystem auf den Hochwasserablauf in kleinen Einzugsgebieten. Schriftenreihe des Sonderforschungsbereichs 150 der TU Braunschweig, H.2. Braunschweig
- Siefert, W.; Havnø, K. (1989): Sturmflutuntersuchungen für die Elbe mit den mathematisch hydraulischen Modellen des Dänischen Hydraulischen Instituts. Behörde für Strom und Hafenbau, Hamburg
- Sacher, H.; Naujoks, C. (1998): Berechnung von Überschwemmungsgrenzen mittels modernster Modelltechnik. In: Wasser & Boden 50 (01/1998)
- Scientific Software Group (2003): WMS - Watershed Modeling System. http://www.scisoftware.com/products/wms_overview/wms_overview.html
- Schmitt, S. (1998): Modellierung der Siel- und Schöpfwerksentwässerung im Unterwesergebiet. Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig. Unveröffentlicht
- Schneider, K. J. (Hrsg.) (1994): Bautabellen für Ingenieure. 11. Aufl. Düsseldorf
- Soil Conservation Service (Hrsg.) (1982): SCS National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. U. S. Department of Agriculture, Washington, 1982
- Statist. Bundesamt Wiesbaden (1998): Corine Land Cover
- Stödter, A. (1994): GIS-gestützte Ermittlung von Abflusskonzentrationsparametern für ein konzeptionelles Hochwassermodell. Braunschweig
- Storchenegger, I. J. (1984): Orts- und ereignisbeschreibende Parameter für Niederschlag-Abfluss-Modelle. Dissertation, ETH Zürich
- v. Storch, H.; Schnur, R.; Zorita, E.: Szenarien & Beratung. Anwenderorientierte Szenarien für den norddeutschen Küstenbereich. Abschlußbericht. BMBF-Förderkennzeichen 01 LK 9510/0, 1998.

- Werner, S. (2000): Hydraulische Modellierung des Siel-Einzugsgebietes Wasserhorst. Studienarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig. Unveröffentlicht
- XP-Software (2003): XP-SWMM. Technical Description.
www.xpsoftware.com/products/pdfs/SWMMTech%20Description.pdf
- Zasada, S. (2001): Modellierung der Siel- und Schöpfwerksentwässerung im Einzugsgebiet der Lesum. Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig. Unveröffentlicht
- Zillich, G.(1977): Ermittlung der Abflussganglinie aus der Wasserstandsganglinie an beliebigen Querschnitten in tidebeeinflussten Gewässern, Mitt. Inst. f. Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der TU Hannover, H. 40

Anhang

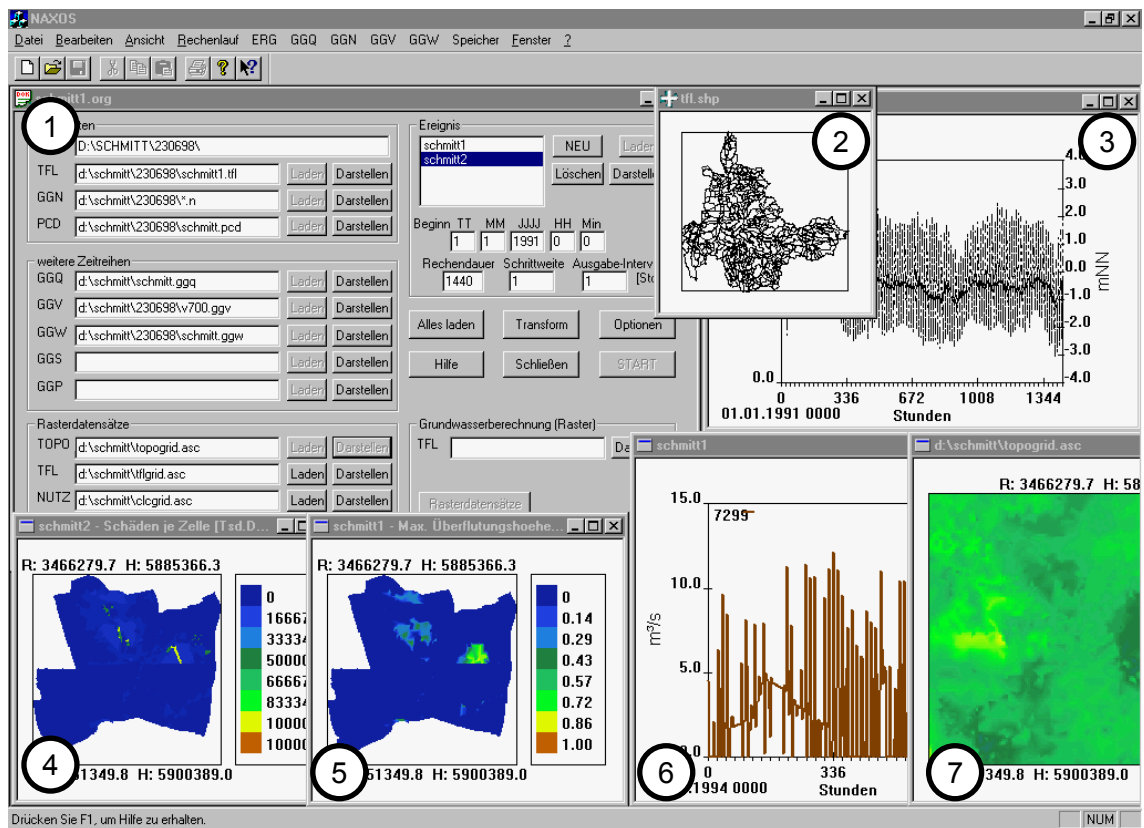


Abb. A1 Eingangsdaten und Ergebnisse auf der Programmoberfläche von NAXOS

Organisationsdatei (Fenster 1), Teileinzugsgebiete (2), gemessene und berechnete Wasserstände (3), berechnete Abflüsse (6), Topografie (7), berechnete max. Überflutungshöhen (5) und aus Schadensfunktionen abgeleitete Schäden je Rasterzelle (4)

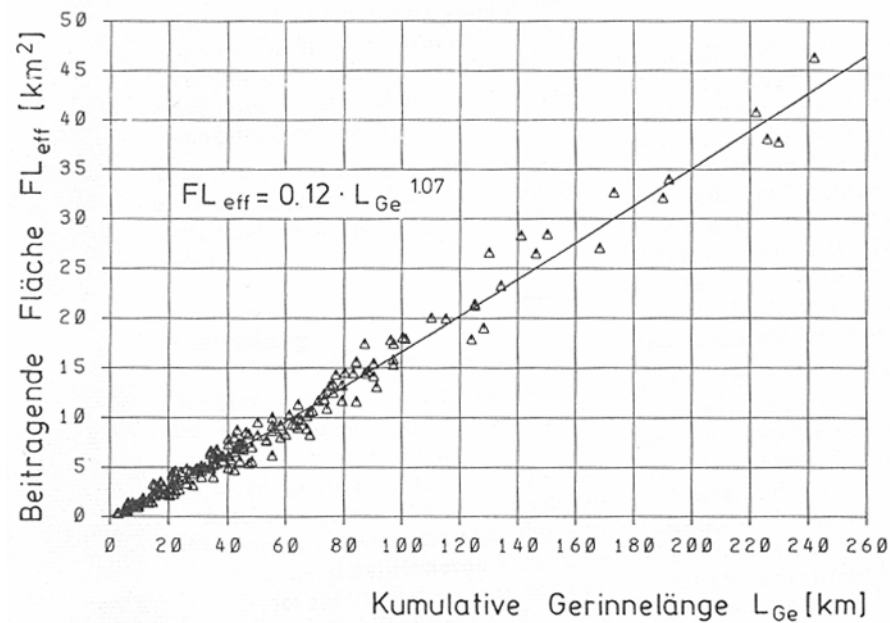


Abb. A2 Schätzung der effektiv beitragenden Fläche aus der kumulativen Gerinnelänge (hergeleitet aus den Werten für das Wiederkehrintervall 20 Jahre; aus: Kölla, 1987)

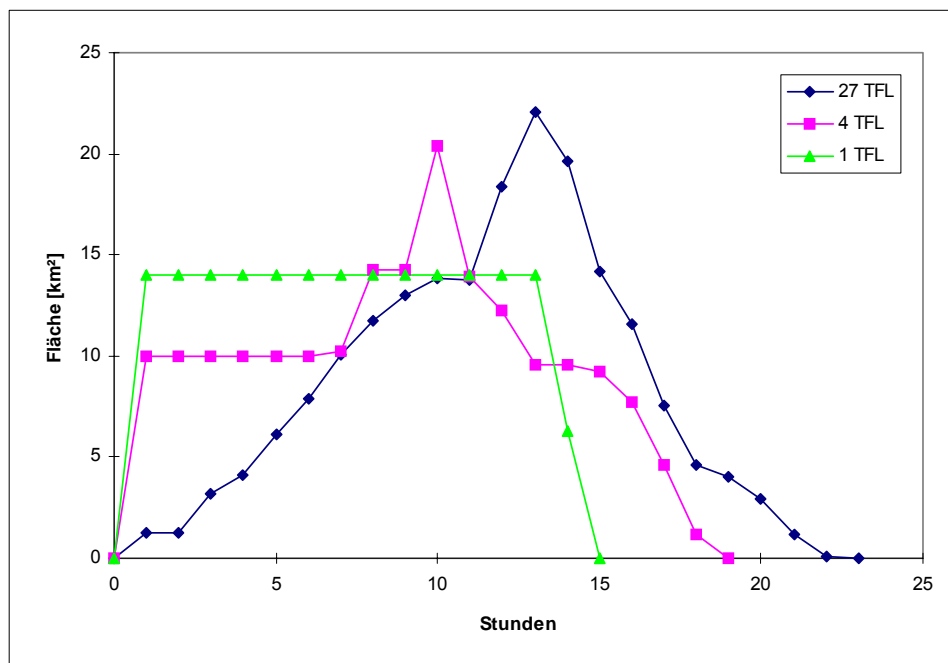


Abb. A3 Fließzeit-Flächen-Diagramm für 3 Aggregationsstufen (27, 4, 1 Teilflächen) am Beispiel Südaue (Allergebiet)

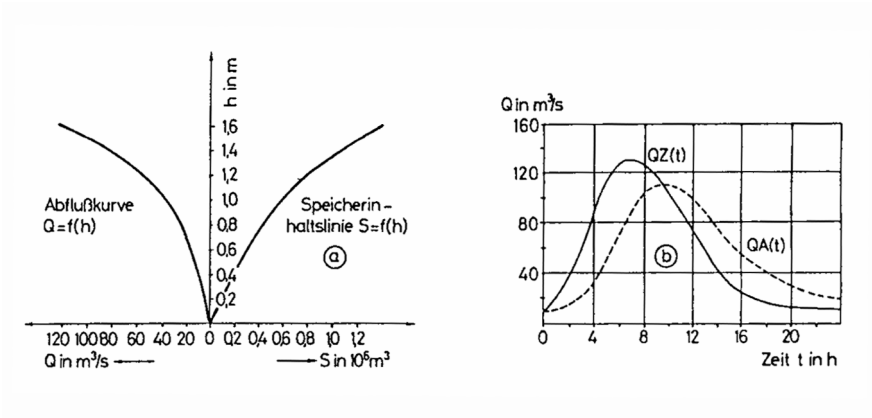


Abb. A4 Abflusskurve, Speicherinhaltslinie, Zufluss- und retendierte Abflussganglinie (aus: Maniak, 1997)

a) Abflusskurve $QA = f(h)$ und Speicherinhaltslinie $S = f(h)$ und
b) Zuflussganglinie $QZ(t)$ und berechnete Abflussganglinie $QA(t)$

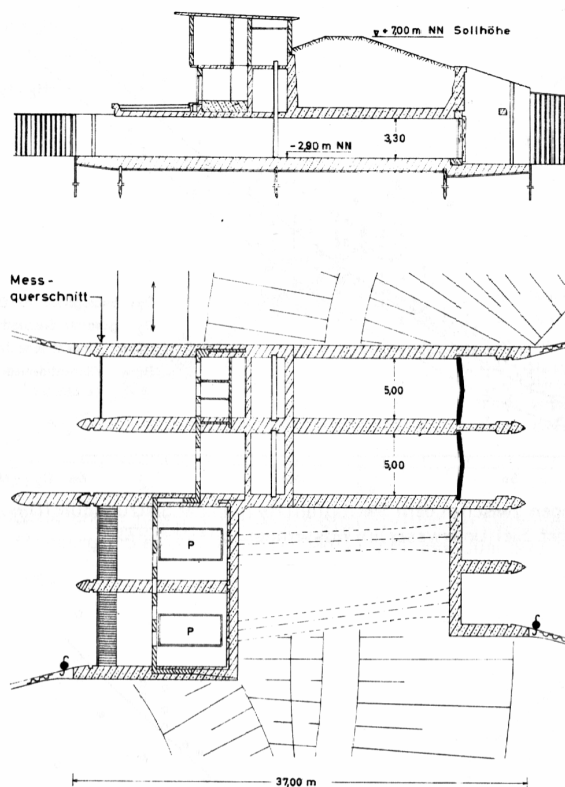


Abb. A5 Aufsicht und Längsschnitt des Käseburger Siedlung (aus: Kunz, 1975)

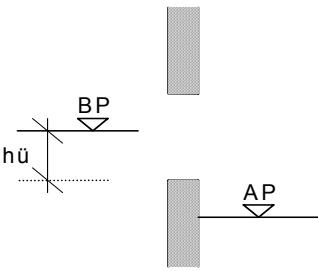
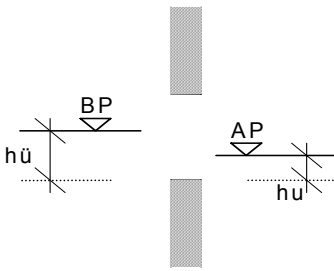
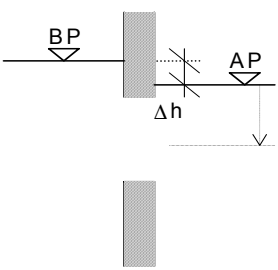
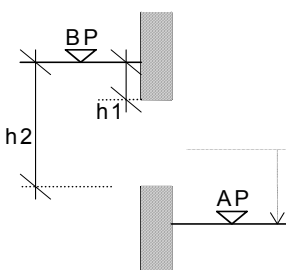
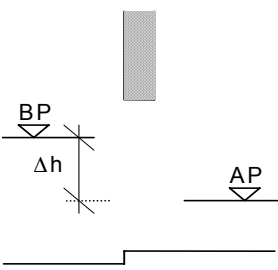
<p>a)</p>  $Q = c \cdot \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_u^{1,5}$ <p>mit $\mu = 0,49$ $b = 6,0\text{m}$ $c = 1$</p>	<p>b)</p>  $Q = c \cdot \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_u^{1,5}$ <p>mit $\mu = 0,49$ $b = 6,0\text{m}$ $0 < c < 1$</p>
<p>c)</p>  $Q = \sqrt{2g \cdot \Delta h} \cdot h_u^{1,5} \cdot \mu \cdot A$ <p>mit $\mu = 0,5$ $A = 6,0\text{m} \cdot 0,4\text{m}$</p>	<p>d)</p>  $Q = c \cdot \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_1^{1,5}$ <p>mit $\mu = 0,5$ $b = 6,0\text{m}$</p>
<p>e)</p>  $Q = -0,0071 \cdot h_v^2 + 0,556 \cdot h_v + 1,347$ <p>mit $h_v = n \cdot \Delta h$ $n = 0,761 \cdot e^{(-0,0134 \cdot BP)}$</p>	<p>a) vollkommener Überfall (bei vernachlässigbar kleiner Anströmgeschwindigkeit)</p> <p>b) unvollkommener Überfall (bei vernachlässigbar kleiner Anströmgeschwindigkeit)</p> <p>c) Schlitzzielen</p> <p>d) vollkommener Ausfluss aus großer Öffnung</p> <p>e) Abfluss bei voll geöffnetem Hubschütz</p>

Abb. A6 Fallunterscheidungen zur Berechnung der Sielleistung

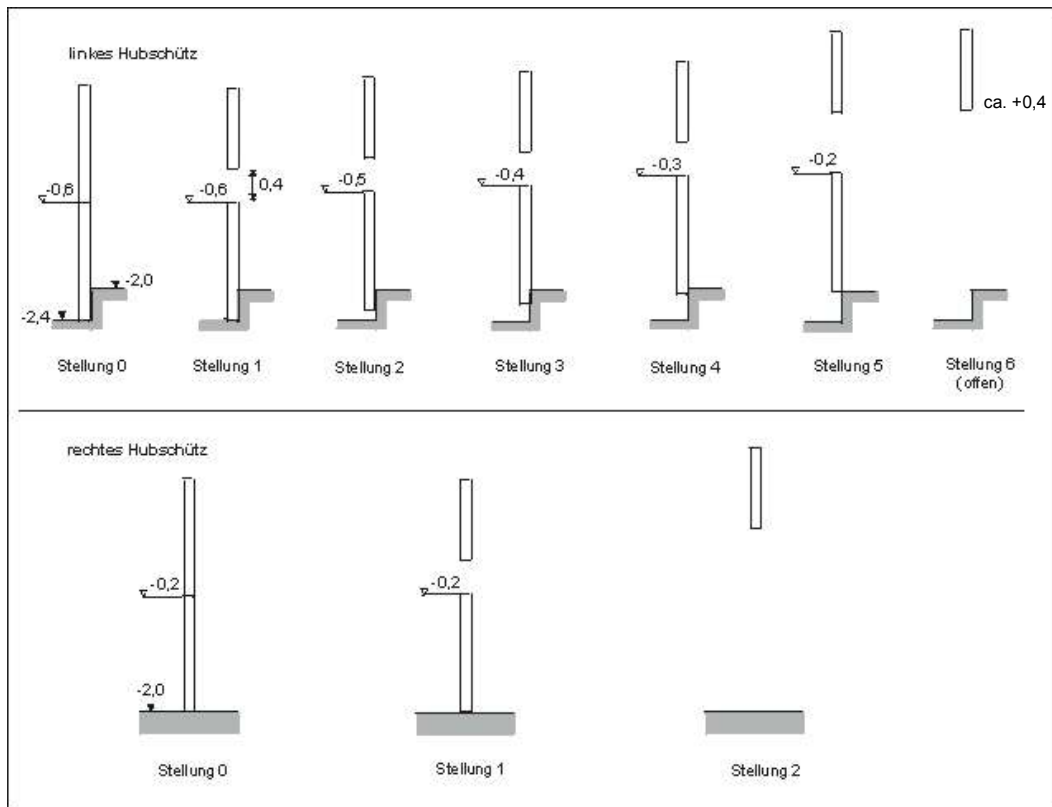


Abb. A7 Schützstellungen am Siel Wasserhorst [m]

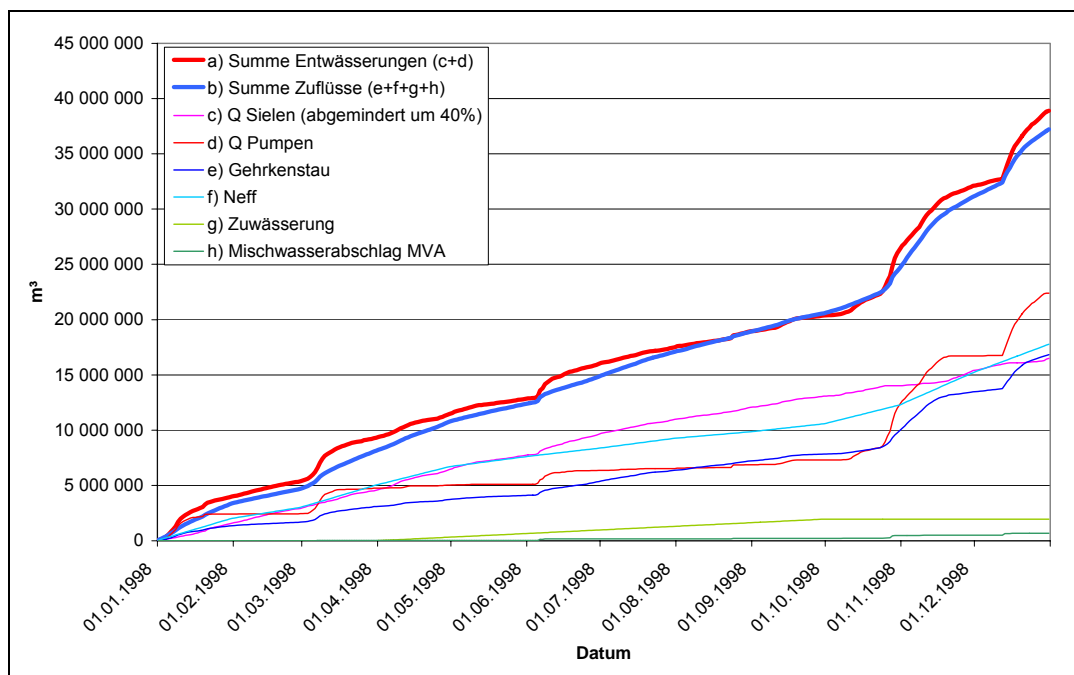


Abb. A8 Berechnete Zu- und Abflusssummen für das Sieleinzugsgebiet Wasserhorst (Kalenderjahr 1998)

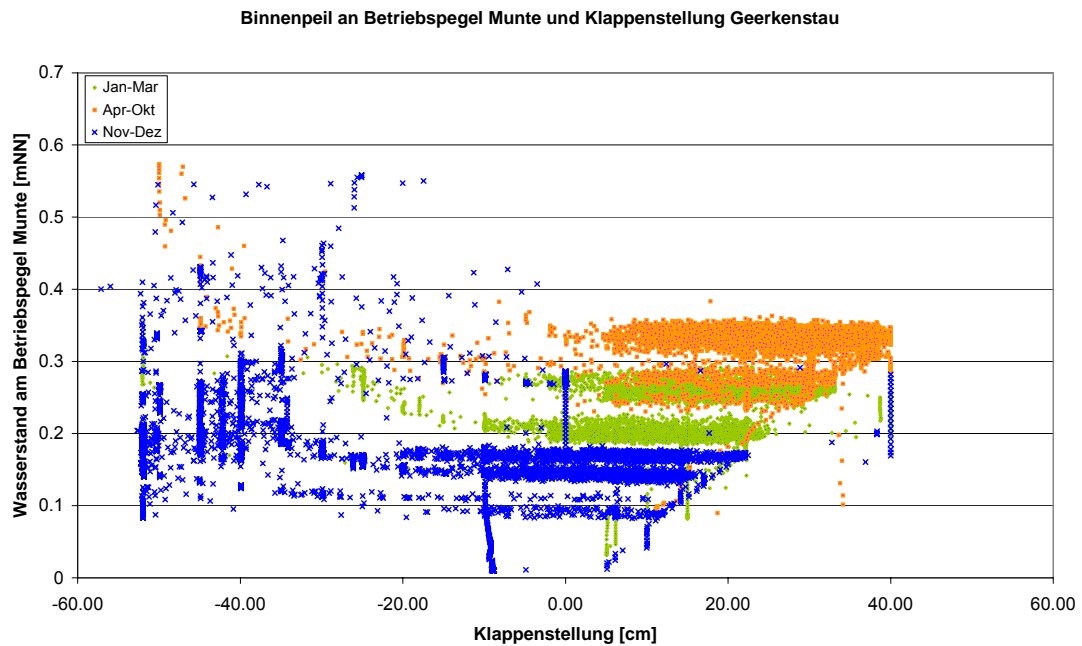


Abb. A9 Binnenpeil am Betriebspegel Munte und eingestellte Höhe der Stauklappe Geerkenstau im Kalenderjahr 1998

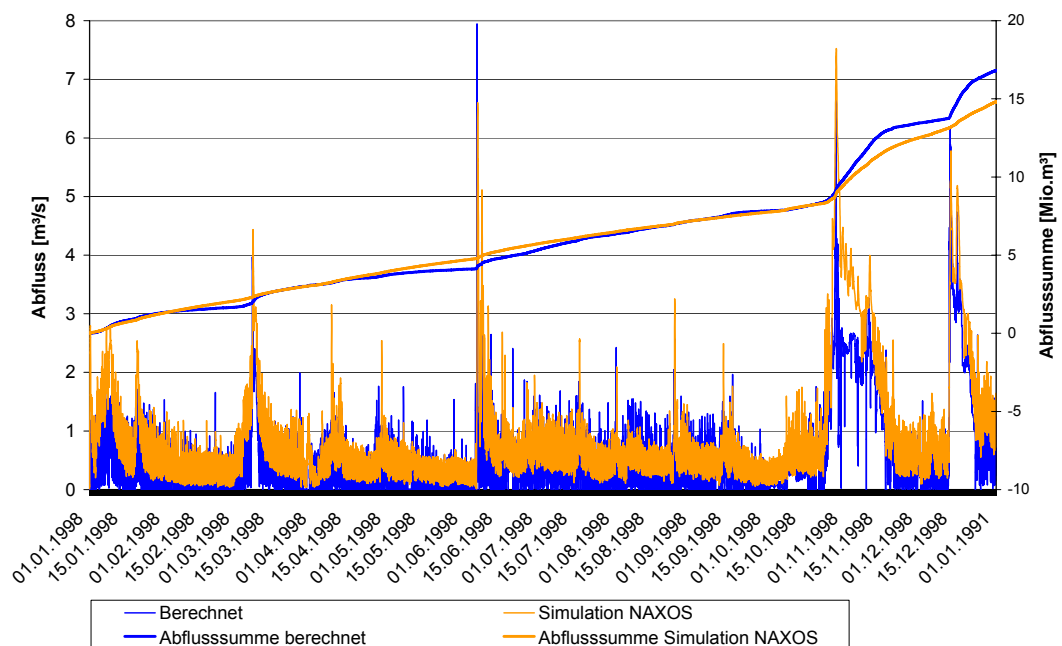


Abb. A10 Berechnete und simulierte Abflüsse und Abflusssummenlinien am Geerkenstau

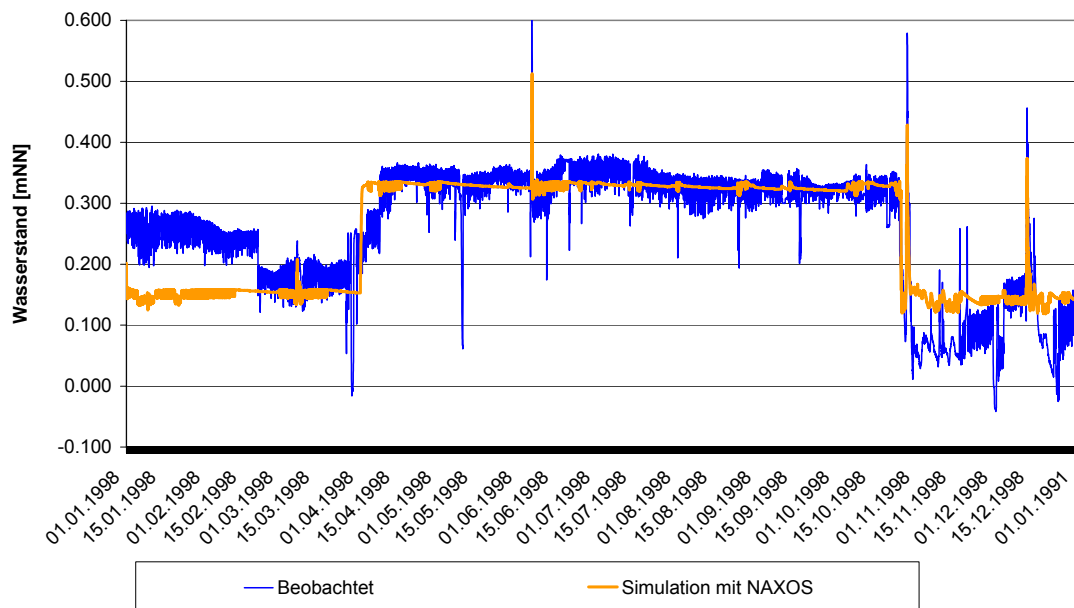


Abb. A11 Beobachtete und simulierte Wasserstände am Geerkenstau (Binnenpeil)

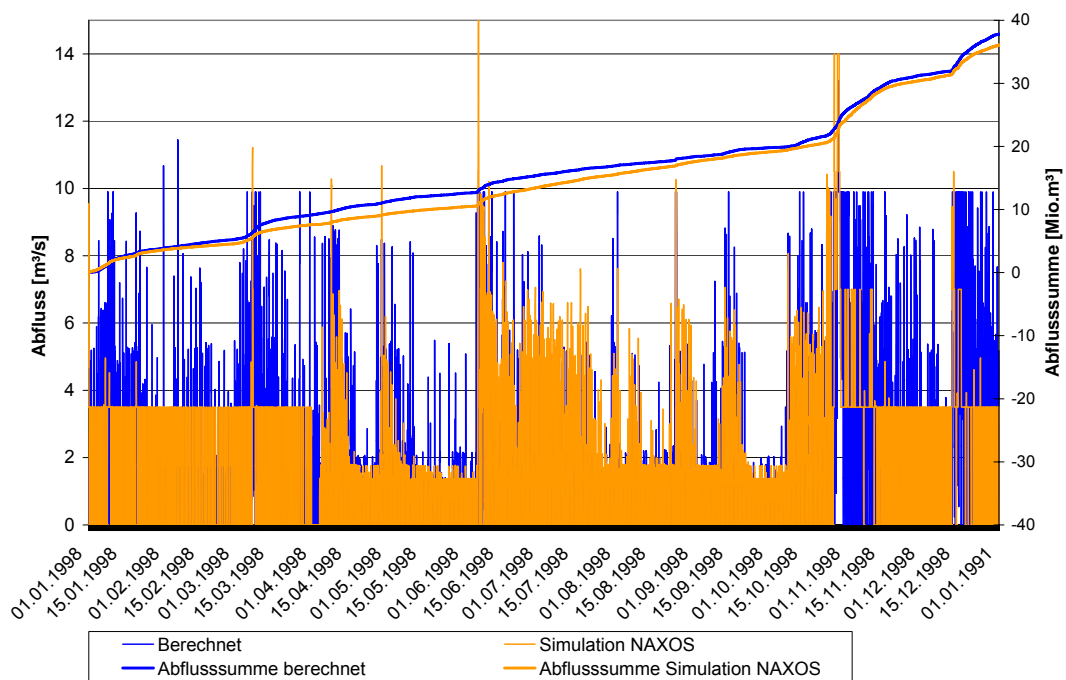


Abb. A12 Berechnete und simulierte Abflüsse und Abflusssummenlinien am Schütz Wasserhorst

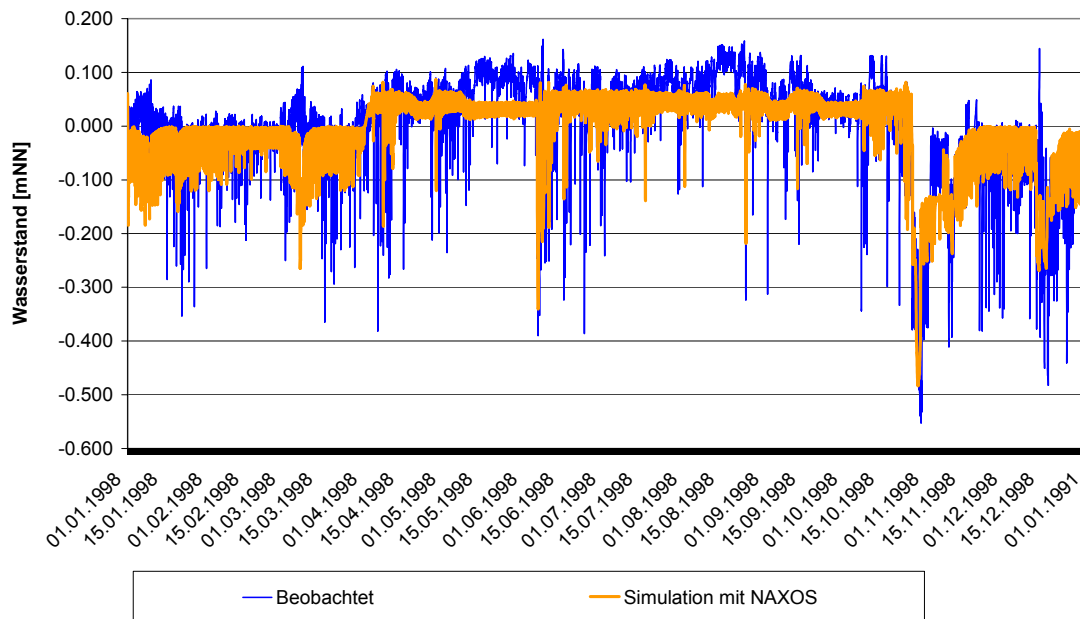


Abb. A13 Beobachtete und simulierte Wasserstände am Schütz Wasserhorst (Binnenpeil)

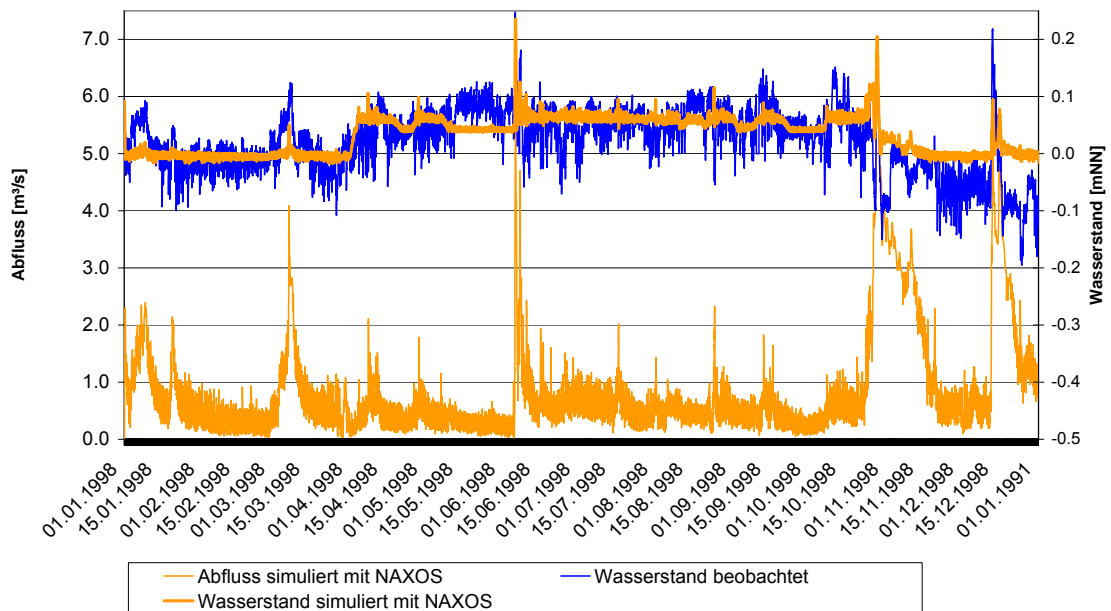


Abb. A14 Beobachtete und simulierte Wasserstände und simulierte Abflüsse am Betriebspegel Walle MVA

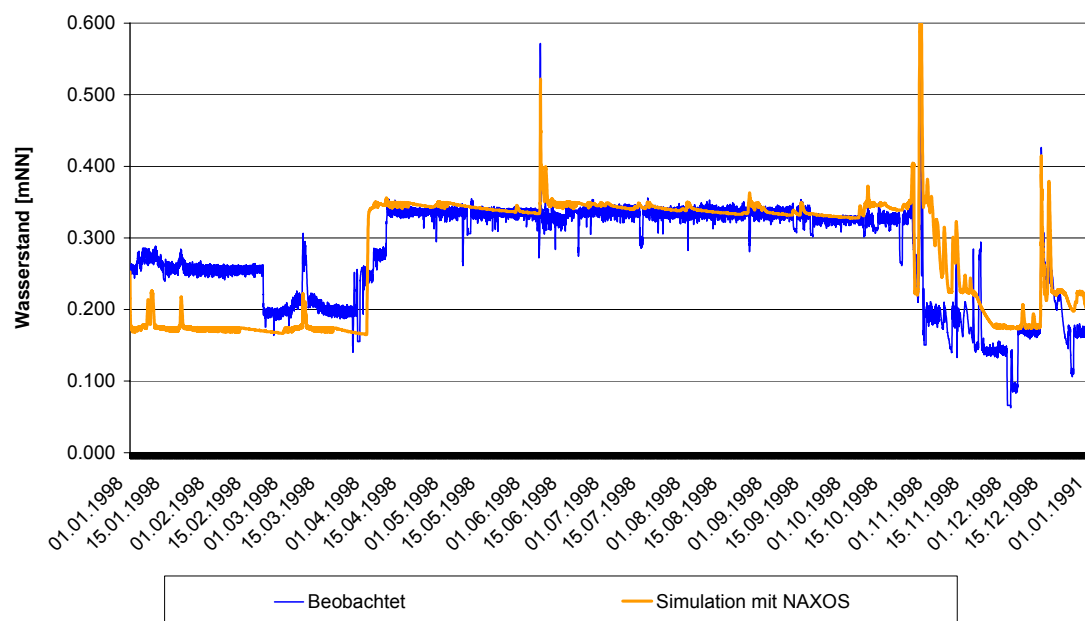


Abb. A15 Beobachtete und simulierte Wasserstände am Betriebspegel Munte / Kuhsiel

Tab. A1 Verwendete Rechenprozeduren in NAXOS

Nr.	Funktion	Erläuterung
103	mod. Abflussbildung nach SCS-Verfahren	berücksichtigt Verdunstung, Bodenfeuchtebilanz
13	Inverse Distanz-Wichtung IDW	automatische Berechnung des Gebietsniederschlags für jede Teilfläche
121	Abflusskonzentration	verwendet Parameter Gewässerdichte, ermöglicht Basisabfluss durch Speichervorfüllung
131	Speichervorfüllung	Simulation des Basisabflusses durch Vorgabe der Anfangsabflüsse für jede Abflusskomponente
40	Retention im Gerinne	Abflussberechnung ohne Rückstaeinfluss
60	Einlesen einer Seitenwellenganglinie	Verwendet für Zuwässerung
70	Einlesen eines Wasserstandsganglinie	Stellt untere Randbedingung für Kettenspeicheransatz
80	Schneesimulation	Bilanzierung der Schneeprozesse in Abhängigkeit von 50 m Höhenstufen
81	Vorgabe der Höhe ü.NN	für Schneesimulation
91	Verdunstung	Ganglinie wird aus Jahresverdunstung und vorgegebener Verteilung berechnet
143	Sielzugberechnung ohne Rückströmung	Abflussberechnung mit Rückstaeinfluss
145	Grabenquerschnitte und -längen	wird kombiniert mit Prozedur 143
146	Hypsometrische Kurven	wird kombiniert mit Prozedur 143
151	Wasserbauwerk: Siel	wird kombiniert mit Prozedur 143
152	Wasserbauwerk: Schöpfwerk	wird kombiniert mit Prozedur 143
153	Wasserbauwerk: Hubschütz	wird kombiniert mit Prozedur 143
154	Wasserbauwerk: Stauklappe	wird kombiniert mit Prozedur 143

Tab. A2 Modellparameter in NAXOS

Bezeichner	Beispielwert	Simulationsansatz und Modellparameter
103 mod. Abflussbildung nach SCS		
Bopheu	0 [mm]	Bodenfeuchte in mm als Abweichung vom SCS-Standardwert
I_a	2 [mm]	Anfangsverlust des Niederschlags in [mm]
anto	0,1 [-]	Oberflächenanteil des schnellen Abflusses [0..1]
I_{max}	5 [mm]	Maximal zulässige Größe des Interceptionsspeichers [mm]
gw	-9,9 [m]	Mittlerer Grundwasserflurabstand {optional}
13 Inverse Distanz-Wichtung		
r_{max}	0 [km]	maximaler Suchradius
n_{Stat}	3 [-]	maximale Anzahl an Stationen
P	1 [-]	Potenz der Entfernungsgewichtung
121 Abflusskonzentration mit Einzellinearspeichern mit Gewässerdichte		
$fspk_o$	1 [-]	Faktor für die Speicherkonstante des Oberflächenabflusses
$fspk_i$	50 [-]	Faktor für die Speicherkonstante des Interflow
$fspk_u$	2000 [-]	Faktor für Speicherkonstante des Grundwasserabflusses
$GewD_{min}$	500 [m/km ²]	Mindest-Gewässerdichte
131 Basisabfluss als Speichervorfüllung		
q_{Obas}	0,0 [l/s·km ²]	Anfangsabflussspende Oberflächenspeicher
q_{Ibas}	1,0 [l/s·km ²]	Anfangsabflussspende Interflowspeicher
q_{Ubas}	5,0 [l/s·km ²]	Anfangsabflussspende Grundwasserspeichers
40 Gerinneretention mit Einzellinearspeicher		
$fspk_r$	1,0 [-]	Kalibrierungsfaktor für die Speicherkonstante der Gerinneretention
91 Jahresverdunstung		
V_a	400 [mm]	Höhe der jährlichen aktuellen Evapotranspiration
143 Kettenspeicher		
Breite	15,0 [m]	Breite des Sieltiefquerprofils
W_{start}	-9,0 [n+NN]	Startwasserstand; -9 führt zur Berechnung des Startwasserstandes bei Annahme stationärer Anfangsabflüsse
B_R	1 [-]	De-/Aktivierung der Rückstromsimulation 1 = ja; 0 = nein

Nr _{Quer}	12345 [-]	Nummer des zugeordneten Querprofils		
Name	„Kuhsiel“ [-]	Bezeichner (optional)		
-1,75 -1,71 2,29 2,50 4,00	0 1724 374684 451710 1449210	Speicherinhaltslinie (optional): Paare von Flächenanteil [0 - 1] und Höhe [m+NN]		
145 Grabenkategorien				
1000 2000 5000	10,0 5,0 2,0	5,0 2,0 1,0	0 0 0	Regelprofile für drei Grabenkategorien: Gesamtlänge, Breite an der Oberkante, Tiefe und Böschungswinkel (1=45Grad, 0 = Senkrecht)
146 Topographie				
0,000 0,078 ... 0,989 1,000	5,0 6,160 9,230 9,660	Hypsografische Kurve: Paare von Flächenanteil [0 - 1] und Höhe [m+NN]		
151 Siel				
b _{Siel}	6 [m]	Breite eines Siels		
n _{Siel}	2 [-]	Anzahl Siele je Bauwerk		
W _{soll}	-0,25 [mNN]	Sollwasserstandsabsenkung am Betriebspegel im Sommerhalbjahr		
Nr _{Ref}	12345 [-]	Nummer des Betriebspegels		
h _D	-2,75 [mNN]	Drempelhöhe des Siels		
h _{Wi}	-0,35 [m]	Sollwasserstandsabsenkung im Winterhalbjahr		
t _Ö	6 [min]	Öffnungsdauer der Sielstemmtore		
h _Ö	0,1 [m]	Öffnungshöhendifferenz		
152 Schöpfwerk				
Nr _{Ref}	[-]	Nummer des Betriebspegels		
W _{off}	[mNN]	Unterer Schwellwert des Wasserstandes, bis zu geschöpft wird		
h _{Wi}	0,35 [m]	Sollwasserstandsabsenkung am Betriebspegel im Winterhalbjahr		
Nr _{Steu}	12345 [-]	Nummer des Steuerpegels, der An/Aus vorgibt (optional)		
Nr _{Qab}	12345 [-]	Nummer eines Pegels mit Abflussganglinie (optional)		
Nr _{Ziel}	30000 [-]	Nummer des Kettenspeichers, in den der geförderte Abfluss umgeleitet wird (optional)		

153 Schütz		
b_{Siel}	6,0 [m]	Breite des Schützes [m]
n_{Siel}	1 [-]	Anzahl Hubschütze je Bauwerk
μ_{153}	0,50 [-]	Beiwert
Nr_{Ref}	22600 [-]	Betriebspegel [-]
W_{soll}	0,07 [mNN]	Sollwasserstand am Betriebspegel
Datei	schuetz.csv	Dateibezeichner für Schütz-Tabellendaten
1	0,40	-0,60
2	0,40	-0,50
3	0,40	-0,40
4	0,40	-0,30
5	0,40	-0,20
6	9,90	-2,00
154 Stauklappe		
b_{Siel}	10,50 [m]	Breite der Stauklappe
μ_{154}	0,80 [-]	Beiwert mue
Nr_{Ref}	31200 [-]	Referenzpegelnummer
h_D	-0,60 [mNN]	Sohlhöhe der Stauklappe
h_{Wi}	0,35 [m]	Sollwasserstandsabsenkung im Winterhalbjahr
t_{kmin}	[min]	minimale Haltedauer der Klappenstellung
0,20	0,85	Paare von
0,25	0,80	Binnenpeil am Betriebspegel [m+NN] und
0,30	0,75	Höhe der Oberkante der Stauklappe [m] über
0,35	0,70	Sohlhöhe
5,00	0,50	

Tab. A3 Landnutzungsklassen nach CORINE Land Cover

(*Nr. nach Tab. A4)

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Nr*
1. Bebaute Flächen	1.1 Städtisch geprägte Flächen	1.1.1 Durchgängig städtische Prägung	5
		1.1.2 Nicht durchgängig städtische Prägung	5
		1.2.1 Industrie- und Gewerbeflächen	5
		1.2.2 Straßen-, Eisenbahnnetze	5
		1.2.3 Hafengebiete	5
		1.2.4 Flughäfen	5
		1.3 Abbauf., Deponien und Baustellen	5
		1.4 Städt. Grünflächen und Freizeitanlagen	2
2. Landwirtschaftliche Flächen	2.1 Ackerflächen	2.1.1 Nicht bewässertes Ackerland	1
		2.1.2 Regelmäßig bewässertes Ackerland	1
		2.1.3 Reisfelder	1
	2.2 Dauerkulturen	2.2.1 Weinbauflächen	7
		2.2.2 Obst- und Beerenobstbestände	22
		2.2.3 Olivenhaine	22
	2.3 Grünland	2.3.1 Wiesen und Weiden	2
	2.4 Landwirtschaftliche Flächen heterogener Struktur	2.4.1 Einjähr. Kulturen und Dauerkulturen	1
		2.4.2 Komplexe Parzellenstrukturen	1
		2.4.3 Landwirtsch. genutztes Land mit	1
		2.4.4 Land- und forstwirtschaftliche Flächen	23
3. Wälder und naturnahe Flächen	3.1 Wälder	3.1.1 Laubwälder	24
		3.1.2 Nadelwälder	24
		3.1.3 Mischwälder	24
	3.2 Strauch- und Krautvegetation	3.2.1 Natürliches Grünland	21
		3.2.2 Heiden und Moorheiden	21
		3.2.3 Hartlaubbewuchs	23
		3.2.4 Wald-Strauch-Übergangsstadien	23
	3.3 Offene Flächen ohne / mit geringer Vegetation	3.3.1 Strände, Dünen und Sandflächen	21
		3.3.2 Felsflächen ohne Vegetation	29
		3.3.3 Flächen mit spärlicher Vegetation	29
		3.3.4 Brandflächen	29
		3.3.5 Gletscher und Dauerschneegebiete	29
4. Feuchtfächen	4.1 Feuchtfächen im Landesinnern	4.1.1 Sümpfe	2
		4.1.2 Torfmoore	2
	4.2 Feuchtfächen an der Küste	4.2.1 Salzwiesen	2
		4.2.2 Salinen	2
		4.2.3 In der Gezeitenzone liegende Flächen	2
5. Wasserflächen	5.1 Wasserflächen im Landesinnern	5.1 Gewässerläufe und Wasserflächen	6
	5.2 Meeresgewässer	5.2 Lagunen, Mündungsgebiete und Meere	6

Tab. A4 Landnutzung und bodengruppenabhängige Curve Numbers der Bodenfeuchtekategorie II

Nr	Bodennutzung	CN für Bodengruppe			
		A	B	C	D
1	Acker	62	71	78	81
2	Wiese	39	61	74	80
3	Wald	25	55	70	77
4	Ländliche Siedlung	54	70	80	85
5	Städtische Siedlung	89	92	94	95
6	Wasser	100	100	100	100
7	Wein	64	77	83	87
8	Moor	39	61	74	80
9	Industriefläche, zu 80 % versiegelt	92	94	96	98
10	Versiegelungsrestfläche	39	61	74	80
11	Ödland ohne Bewuchs	77	86	91	94
12	Reihenkultur (Hackfrüchte)	70	80	87	90
13	Reihenkultur nach Schichtlinien	67	77	83	87
14	Getreide herkömmlich	64	76	84	88
15	Getreide nach Schichtlinien	62	74	82	85
16	Getreide terrassenartig	60	71	79	82
17	Futterpflanzen (Klee)	62	75	83	90
18	Weide fett	39	61	74	80
19	Weide normal	49	69	79	84
20	Weide karg	68	79	86	89
21	Dauerwiese	30	58	71	78
22	Obstanlagen	36	60	73	79
23	Wald stark aufgelockert	45	66	77	83
24	Wald mittel	36	60	73	79
25	Wald dicht	25	55	70	77
26	Wald sehr dicht	15	44	54	61
27	Wirtschaftshöfe	59	74	82	86
28	Feldwege befestigt	74	84	90	92
29	undurchlässig	100	100	100	100
31	fallow row (poor; contoured, terraced)	66	74	80	82
32	fallow row (good; contoured, terraced)	62	71	78	81
33	small grain (poor; contoured, terraced)	61	72	79	82
34	small grain (good; contoured, terraced)	59	70	78	81
35	rotation meadow (poor, contoured, terraced)	63	73	80	83
36	rotation meadow (good, contoured, terraced)	51	67	76	80
37	pasture or range (poor, contoured)	47	67	81	88
38	pasture or range (fair, contoured)	25	59	75	83
39	pasture or range (good, contoured)	6	35	70	79
40	pasture or range (fair)	49	69	79	84

Tab. A5 Bodengruppen nach SCS und Typisierung
(aus Maniak, 1997, S.297)

Bodengruppe	Beschreibung
A	Böden mit großem Versickerungsvermögen, auch nach starker Vorbefeuchtung, z. B. tiefgründige Sand- und Kiesböden
B	Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen, tief- bis mäßig tiefgründige Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Textur, z. B. Sandböden, Löß
C	Böden mit geringem Versickerungsvermögen, Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauender Schicht, z. B. flachgründige Sandböden, sandiger Lehm
D	Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen, Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel

Tab. A6 Funktionen der ArcView-Extension LWI-Tools

Datenimport in ArcView; NAXOS-Dateien werden beim Datenimport im ersten Arbeitsschritt in das dbase-Format konvertiert. Im zweiten Schritt werden für vorgegebene thematische Felder automatisch Legenden erzeugt:		Datenexport aus ArcView Bereitstellung der Geo-Dateien und Berechnung von Modellparametern aus verschnittenen Eingangsdaten für NAXOS	
TAB-View (Eingangsdaten)	<ul style="list-style-type: none"> - Fließgefälle - Flächegefälle - Strickler-Beiwert - Bodengruppe 	Shapefiles	<ul style="list-style-type: none"> - Teilflächen - Gewässernetz - Landnutzung und Boden
VAR-View (Programmvariablen)	<ul style="list-style-type: none"> - Einzugsgebietsgröße - Fließzeit Gerinne - Fließzeit Landphase - Fließzeit bis Gebietsauslass - Speicherkonstanten 	Rasterdaten	<ul style="list-style-type: none"> - Topografie
BIL-View (Abflussbilanzen)	<ul style="list-style-type: none"> - Gebietsniederschlag - Verdunstung - Abflussbeiwert 	Berechnung der Modellparameter	<ul style="list-style-type: none"> - Zuordnung zwischen Teilflächen und Niederschlagsstationen - Zuordnung prozentuale Landnutzung jeder Teilfläche
Import von Rasterdateien (Keine View)	<ul style="list-style-type: none"> - Maximale berechnete Wasserstände - Überflutungshöhe bei maximalem Wasserstand - Schadenshöhe durch Überflutung 		

Tab. A7 Wasserbauwerke, Messreihen, Steuerpegel, Betriebsweisen und Bezeichner im FGM Lesum

Sielgebiet	Wasserbauwerk, Schöpfwerksleistung und vorliegende Mess- werte	Messwert- Nr.	Betrieb
Vierstücken	Siel Vierstücken W an Unterwasser	- Pegel 1	Sielen bis Soll-Wasserstand am Pegel 83 erreicht ist
	Steuerpegel Vierstücken W gemessen	Pegel 83	
Wasser- horst	Siel Wasserhorst mit zwei hydraul. Hubtoren W an Unterwasser W an Oberwasser Q berechnet	Pegel 1 Pegel 20000 Pegel 20000	Nach Schätzung der zu sielen- den Menge (Tab. 5.2.5) und Abfrage von Binnenpeil am Pegel 4 und Außenpeil wird Hubtor- stellung und Öffnungsdauer von Leitrechner festgelegt.
	Schöpfwerk Wasserhorst 4 x 3,5 m³/s Q berechnet	Pegel 20009	Stufenweises Anspringen der Pumpen in Abhängigkeit vom Wasserstand am Pegel 4
	Steuerpegel MVA Walle W	Pegel 4	
	Pumpwerk MVA Walle Q gemessen	Pegel 23100	
Kuhsiel	Stauklappe Gehrkenstau W an Oberwasser W an Unterwasser Q berechnet	Pegel 6 Pegel 5 Pegel 31220	Klappenstellung zwischen abhängig vom Wasserstand am Pegel 7; Bauwerk wird bei Starkregen geschlossen
	Schöpfwerk Kuhsiel (Horn) 2 x 2,2 m³/s Q gemessen	Pegel 30000	Pumpbetrieb in Abhängigkeit vom Wasserstand am Pegel 7, wenn Geerkenstau wegen Starkregens geschlossen ist
	Steuerpegel Munte W	Pegel 7	
Katrepel	Schöpfwerk Katrepel 2 x 0,5 m³/s W an Oberwasser	-	Pumpbetrieb in Abhängigkeit vom Wasserstand am Pegel 42
	Steuerpegel Katrepel W	Pegel 42	
Osterholz	Schöpfwerk Osterholz 3 x 1 m³/s W an Oberwasser		Pumpbetrieb in Abhängigkeit vom Wasserstand am Pegel 62
	Steuerpegel Osterholz W	Pegel 62	

Tab. A8 Grabenlängen, Grabenstauraum bei bordvollem Abfluss und Gewässerdichte im FGM Lesum

Sieleinzugs- gebiet (EZG)	Kategorie der Gräben	Summe der Grabenlänge [m]	Graben- stauraum [m³]	Grabenstau- raum (je EZG) [m³]	Gewässer- dichte (je EZG) [m/km²]
Vierstücken	I	-	-	420 674	16 584
	II	7 289	35 058		
	III	241 010	385 616		
Wasserhorst	I	12 751	546 622	1 478 443	12 267
	II	20 110	96 731		
	III	521 931	835 090		
Kuhziel	I	12 273	322 103	596 841	3 388
	II	6 647	31 973		
	III	151 728	242 765		
Katrepel	I	-	-	97 521	7 940
	II	600	2 884		
	III	59 148	94 637		
Osterholz	I	-	-	60 861	997
	II	12 320	59 261		
	III	1000	1 600		
Summe		1 179 005	2 654 340	2 654 340	-

Tab. A9 Summe der Zu- und Abflüsse im Sieleinzugsgebiet Wasserhorst für das Kalenderjahr 1998

Jahressumme der Zuflüsse	[Mio. m³]
Effekt. Niederschlag	17,775
Geerkenstau	16,827
Zuwässerung + Qualmwasser	ca. 1,950
Mischwasserabschlag MVA Walle	0,667
Summe	37,219
Jahressumme der Abflüsse	[Mio. m³]
Schöpfwerke	22,391
Sielzug	27,500
Summe	49,891
Jahressumme der abgeminderten Abflüsse	[Mio. m³]
Schöpfwerke	22,391
Sielen	16,500
Summe	38,891

Tab. A10 Summe der Zu- und Abflüsse im Einzugsgebiet des Kuhsiels für das Kalenderjahr 1998

Jahressumme der Zuflüsse	[Mio. m³]
Effekt. Niederschlag	19,855
Zuwässerung	ca. 0,900
Mischwasserabschlag PW Horn	0,042
Summe	20,797
Jahressumme der Entwässerungen	[Mio. m³]
Schöpfwerke	1,268
Geerkenstau	16,827
Summe	18,095